

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto

Camilla Vornanen

ERIKOISLUJIENTÄ BETONIENTÄ AJASTA RIIPPUVAT
MUODONMUUTOSOMINAISUUDET JA KÄYTTÖ
HYBRIDIRAKENTEISSA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä
tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 18.12.2006.

Työn valvoja: Prof. Vesa Penttala

Työn ohjaaja: TkT Andrzej Cwirzen

Tekijä:	Vornanen, Camilla Maaria		
Diplomityö:	Erikoislujien betonien ajasta riippuvat muodonmuutosominaisuudet ja käyttö hybridirakenteissa		
Päivämäärä:	18.12.2006	Sivumäärä:	92 + 42
Osasto:	Rakennus- ja ympäristötekniikka		
Professuuri:	Rakennusmateriaalitekniikka		
Valvoja:	Prof. Vesa Penttala		
Ohjaaja:	TkT Andrzej Cwirzen		

Diplomityössä tutkittiin kolmen koostumukseltaan erilaisen erikoislujan betonin kutistumista ja virumista sekä niiden käyttöä hybridirakenteissa. Hybridirakennekokeissa selvitettiin samaan palkkiin valettujen erikoislujan ja tavanomaisen betonikerroksen välisen sauman kestävyyttä leikkaus- ja taivutuslujuuskokeilla. Lisäksi tehtiin suppea tutkimus erikoislujien betonien pistekuormankestävyydestä. Työ on osa Teknillisen korkeakoulun Rakennusmateriaalitekniikan laboratorion erikoislujia betoneita käsittelevää tutkimusta.

Diplomityö koostuu kirjallisuustutkimuksesta ja kokeellisesta osasta. Kirjallisuustutkimuksessa on tarkasteltu erikoislujan betonin koostumusta, ominaisuuksia ja käyttömahdollisuuksia sekä betonin kutistumis- ja virumisominaisuuksia.

Kokeellisessa osassa tutkitut betonit olivat työstettävyydeltään itsetiivistyvien betonien kaltaisia (T50-aika 4,5-8,2 s ja leviämä 700-880 mm). Niiden 28 vuorokauden lujuus oli 125-200 MPa. Betoneihin käytetyt materiaalit olivat hiekka, kvartsijauhe, sementti, mikrosilika, vesi ja polykarboksylaattipohjainen notkistin, joiden lisäksi yhteen betoneista lisättiin sisäistä kutistumista rajoittavaa polymeeriä. Kaikissa kokeissa puolet koekappaleista lämpökäsiteltiin 90°C:n vesihöyryssä 48 tunnin ajan. Lämpökäsittely paransi betonien lujuutta huomattavasti.

Kutistuma- ja virumakokeet tehtiin sekä 65 % että 85 % suhteellisessa kosteuspitoisuudessa ja 20 °C:n lämpötilassa. Muodonmuutoksia seurattiin vuoden ajan. Tulokset osoittivat, että kutistumisessa ja virumisessa eri betonien välillä ei ollut juurikaan eroa. Sen sijaan lämpökäsittelyn vaikutus näkyi molemmissa kokeissa joka betonilla. Koekappaleet kutistuivat voimakkaasti lämpökäsittelyn aikana, jonka jälkeen kutistuminen tasoittui. Lämpökäsittelemättömät kappaleet kutistuivat vähemmän ja hitaammin. Sen sijaan virumista lämpökäsittely vähensi huomattavasti, vaikkakin lämpökäsiteltyt kappaleet saavuttivat loppuvirumansa varhaisemmassa vaiheessa kuin lämpökäsittelemättömät.

Hybridirakennekokeissa tutkittiin kolmea erilaista palkkityyppiä, joista yhtä voitaisiin nimittää myös pilariksi. Lisäksi yhden palkkityypin eri kerrosten kutistumista seurattiin koestukseen saakka. Taivutus- ja leikkauslujuuskokeet suoritettiin 28 d:n iässä. Betonikerrosten kutistumisissa oli suuri ero, mutta koekappaleissa ei tapahtunut halkeilua ennen koestusta. Lujuudet osoittautuivat vähintään yhtä hyviksi, kuin vastaavankokoisilla normaalibetonipalkeilla, ja usein paljon paremmiksikin. Erikoislujan ja tavanomaisen betonin yhdistäminen voisi olla eduksi rakenteissa, joissa erikoislujaa betonia voidaan käyttää johonkin yksittäiseen rakenneosaan ja näin parantaa kyseisen kohdan lujuusominaisuuksia sekä pienentää rakennekokoja.

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS

Author:	Vornanen, Camilla Maaria	
Thesis:	Time-dependent deformations of ultra high performance concretes and hybrid structures	
Date:	18.12.2006	Number of pages: 92 + 42
Department:	Civil and Environmental Engineering	
Professorship:	Building Materials Technology	
Supervisor:	Prof. Vesa Penttala	
Instructor:	D.Sc. Andrzej Cwirzen	

The purpose of this Master's thesis was to examine the shrinkage and creep properties of three different ultra high performance concretes (UHPC) and to find out if they are usable in a hybrid structure with normal strength concrete. UHPC and normal strength concrete were cast in a same beam or column and the quality of the joint was tested with flexural strength and shear capacity tests. In addition to these main tests the strength of a UHPC slab under a point loading was examined. This work is part of a research concerning UHPC done at the laboratory of Building Materials Technology at the Helsinki University of Technology.

This Master's thesis consists of a literature review and an experimental part. In the literature part the composition, properties and potential use of UHPC as well as the shrinking and creep properties of both normal and high strength concrete were studied.

The concretes examined in the experimental part were practically self-compacting (T50-time 4,5-8,2 s and spread 700-880 mm) and their 28 days strength was 125-200 MPa. Materials used in the concretes were sand, quartz, cement, micro silica, water and polycarboxylate-based superplasticizer. In addition, a super absorbent polymer was used in one of the concretes. In every test phase of the experimental part half of the specimens were heat treated in 90 °C steam for 48 hours. Heat treatment improved the strength properties significantly.

The shrinkage and creep tests were performed in 65 % and 85 % relative humidity and 20 °C temperature. Deformations were checked for one year. The results were quite similar for the three different concretes. Heat treated specimens had higher shrinkage which developed mostly during the first few days. The non heat treated specimens shrank during a longer period but the final shrinkage was smaller. Instead, heat treating decreased creeping remarkably, though the heat treated specimens reached their final creep earlier than the non heat treated ones.

In the hybrid structure tests two different types of beams and a column were tested. In addition, the shrinking of the different concrete layers of one beam type was measured. Flexural strength and shear capacity tests were performed at the age of 28 days. The shrinkage results were different for UHPC and normal concrete but still there was no cracking of the specimens before testing. Hybrid structures have potential use in cases where UHPC can be used in certain parts of a large structure. Thus better strength and durability of the structure and smaller structure dimensions could be reached.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on osa Teknillisen korkeakoulun Rakennusmateriaalitekniikan laboratorion projektia "Erikoislujien betonien valmistustekniikka ja ominaisuudet". Projektin rahoittajina olivat Tekes ja Rakennusteollisuus RT ry. Tämän työn valvojana toimi professori Vesa Penttala ja ohjaajana tekniikan tohtori Andrzej Cwirzen.

Kiitokset sekä Vesa Penttalalle että Andrzej Cwirzenille rohkeasta ohjauksesta ja kannustuksesta tämän työn pariin. Olen iloinen siitä, että näin kiinnostava aihe osui eteeni ja sain tehdä työn leppoisassa työympäristössä, jossa muullekin jäljellä olevalle opiskelulle annettiin tilaa.

Kiitos Karri Mäkiselle kaikesta ajasta ja opastuksesta niin käytännön töiden kuin teoriankin suhteen sekä Pertti Alholle korvaamattomasta käytännön avusta, uusista näkökulmista ja ennen kaikkea mukavasta valuseurasta. Kiitos myös Ari Iltaselle, Veli-Antti Hakalalle, Fahim Al-Neshawylle ja Juha Komoselle avusta ja neuvoista työn eri vaiheissa sekä Ennio Zuccarolle aina ystävällisestä ja avuliaasta suhtautumisesta.

Opiskelutovereilleni osoitan kiitokset hauskoista ja ikimuistoisista teekkariajoista. Kaikkein suurimmat kiitokset kuuluvat kuitenkin äidilleni ja Freddyille. Äiti, kiitos ainutlaatuisesta tuesta ja ymmärryksestä niin opiskelussa kuin muussakin elämässä sekä iloisesta kannustuksesta, jota jokaisesta puhelinsoitostakin tätä työtä tehdessä sain. Freddyille kiitos siitä, että jaksoit aina tarvittaessa auttaa ja pohtia työn ongelmia kanssani, mutta vielä paljon enemmän siitä, että kotiin on aina ihanaa tulla.

Espoossa 18.12.2006



Camilla Vornanen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT	4
SISÄLLYSLUETTELO	5
MERKINNÄT	8
1 JOHDANTO	9
2 ERIKOISLUJAN BETONIN OMINAISUUDET JA KÄYTTÖ	10
2.1 Erikoislujan betonin koostumus ja tyypilliset ominaisuudet	10
2.2 Lämpökäsittely erikoislujan betonin jälkihoitona	12
2.3 Itsetiivistyvyys	13
2.4 Erikoislujan betonin käytön etuja ja haittoja	14
2.5 Erikoislujan betonin käyttö maailmalla	16
3 BETONIN KUTISTUMINEN JA VIRUMINEN	17
3.1 Kutistumatyypit	17
3.1.1 Autogeeninen kutistuma	19
3.1.2 Kuivumiskutistuma	20
3.1.3 Plastinen kutistuma ja paisuminen	21
3.1.4 Karbonatisoitumiskutistuma ja lämpökutistuma	22
3.1.5 Estetty kutistuminen	23
3.2 Kutistumaan vaikuttavia tekijöitä	24
3.2.1 Betonin ainesosien vaikutus	24
3.2.2 Jälkihoidon merkitys	25
3.3 Betonin viruminen	26
3.3.1 Virumaan vaikuttavia tekijöitä	28

4	KOKEELLISEN TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	29
5	TUTKIMUKSESSA KÄYTETYT BETONIT	30
5.1	Materiaalit	30
5.2	Kutistuma- ja virumakokeissa käytetyt betonit	32
5.3	Hybridirakenne- ja pistekuormakokeissa käytetyt betonit	33
5.4	Tutkimuksessa käytettyjen betonien valmistus	36
6	TUOREEN BETONIN KOKEET	38
6.1	Tuoreen betonin kokeiden suorittaminen	38
6.1.1	Lämpötila	38
6.1.2	Ilmamäärä	38
6.1.3	T50-aika ja leviämä	39
6.1.4	Minikartiokoe	39
6.1.5	Painuma ja Vebe-koe	40
6.2	Tuoreen betonin kokeiden tulokset	40
6.3	Tuoreen betonin koetulosten tarkastelu	41
7	PURISTUSLUJUUSKOKEET	42
7.1	Puristuslujuuskokeiden suorittaminen	42
7.2	Puristuslujuuskokeiden tulokset	43
7.3	Puristuslujuuskokeiden tulosten tarkastelu	44
8	KUTISTUMA- JA VIRUMAKOKEET	45
8.1	Kutistuma- ja virumakoekappaleet ja koejärjestelyt	45
8.2	Kutistuma- ja virumakokeiden tulokset	49
8.3	Kutistuma- ja virumakoetulosten tarkastelu	53
9	HYBRIDIRAKENNEKOKEET	54
9.1	Hybridirakennekoekappaleet	54
9.2	Koekappaleiden valmistus ja säilytys ennen koestusta	57

9.2.1	Yleistä	57
9.2.2	Palkkien valmistus	58
9.2.3	Koekappaleiden säilytys	60
9.3	Hybridirakennekokeiden suorittaminen	60
9.3.1	Taivutus- ja leikkauslujuuskokeet	60
9.3.2	Palkin 1 kutistuman mittaus	62
9.4	Hybridirakennekokeiden tulokset	63
9.4.1	Taivutus- ja leikkauslujuuskokeiden tulokset	63
9.4.2	Palkin 1 kutistumatulokset	65
9.5	Hybridirakennekokeiden tulosten tarkastelu	70
9.5.1	Yleistä	70
9.5.2	Tilastollinen tarkastelu	72
9.5.3	Taivutuslujuustulosten tarkastelu	75
9.5.4	Leikkauslujuustulosten tarkastelu	79
9.5.5	Palkin 1 kutistumatulosten tarkastelu	81
10	PISTEKUORMAKOKEET	83
10.1	Koekappaleet ja niiden valmistus	83
10.2	Pistekuormakokeiden suorittaminen	83
10.3	Pistekuormakokeiden tulokset ja niiden tarkastelu	84
11	YHTEENVETO	85
	KIRJALLISUUSVIITTEET	88
	LIITTEET	92

MERKINNÄT

Tämän työn kokeellisessa osassa käytetään tekstin tiivistämiseksi muutamia lyhenteitä. Erikoisluihin betoneihin viitataan tunnuksilla

- **F26/022/H**
- **F26/022/N**
- **F3/022/H**
- **F3/022/N**
- **F26/026/SAP/H**
- **F26/026/SAP/N**

Näitä tunnuksia käytetään myös laboratorion erikoisluija betoneita käsittelevästä projektista laaditussa virallisessa julkaisussa. Projektissa tutkittavia betoneita oli paljon enemmän, joten tähän tutkimukseen valitut kolme betonia merkitään niiden alkuperäisillä betonin koostumukseen viittaavilla tunnuksilla F26, F3 ja F26 SAP. Merkintä 022 tai 026 tarkoittaa betonien vesi-sideainesuhdetta, joka siis betoneilla F26/022 ja F3/022 oli 0,22 ja betonilla F36/026/SAP 0,26. Kirjain H tai N kertoo, onko koekappaleet lämpö-käsitelty (kirjain H) vai jälkihoidettu pelkästään kosteushuoneessa (kirjain N).

Betonissa F26/026/SAP ainesosat ovat muutoin samat kuin betonissa F26/022, mutta siinä on lisäaineena autogeenista kutistumaa rajoittavaa polymeeriä (SAP). SAP toimii betonissa sisäisenä jälkihoidtona. Polymeerin lisäyksen vuoksi betonin F26/026/SAP vesi-sideainesuhde on eri kuin betonilla F26/022.

Kirjaimella C tarkoitetaan normaalibetonia, ja kirjaimella M masuunikuona-betonia. Nimitystä "normaalibetoni" käytetään tavanomaisesta betonista, jonka lujuusluokka on K35. Masuunikuonabetoni on ominaisuuksiltaan ja pääosin koostumukseltaan vastaavaa kuin normaalibetoni, mutta osa sementistä on korvattu masuunikuonalla lämpökäsittelyn mahdollistamiseksi.

Erilaisista hybridirakenteista käytetään nimityksiä palkki 1, palkki 2 ja palkki 3. Vastaavankokoisista yhdestä betonista valmistetuista koekappaleista käytetään nimityksiä **vertailupalkki A ja vertailupalkki B.**

Taulukoissa ja liitteissä lyhenne **ka** tarkoittaa keskiarvoa ja lyhenne **kh** keskihajontaa

1 JOHDANTO

Erikoisluja betoni on uudehko materiaali, jonka käyttö on tavanomaiseen matalampilujuuksiseen betoniin verrattuna vielä vähäistä. Kiinnostus sitä kohtaan lisääntyy kuitenkin koko ajan niin tutkimuksen kuin materiaaliteollisuudenkin parissa, ja oletettavissa on, että erikoislujan betonin jalansija betonimaailmassa vain vahvistuu. Mitä tutummaksi se tulee, sitä selvemmin erottuvat edukseen sen erinomaiset, betoneille ennen kuulumattomat ominaisuudet. Erikoislujaa betonia voidaankin pitää ihan omana materiaalinaan, niin oleellisesti se poikkeaa tavanomaisesta betonista erityisesti lujuutensa ja muiden hyvien ominaisuuksiensa ansiosta. Erikoisluja betoni ei sellaisenaan syrjäytäkään tavanomaista betonia, vaan soveltuu aivan uudenlaisiin käyttökohteisiin, joiden suunnittelussa betonia ei ole ennen voitu ajatella. Kenties myös tavanomaisen betonin käyttömahdollisuudet paranevat, kun näitä kahta materiaalia opitaan sujuvasti yhdistämään.

Yksi tunnetuimmista erikoislujista betoneista on reactive powder concrete (RPC), joka kehitettiin Ranskassa Bouyguesin laboratoriossa 1990-luvulla. Tällöin onnistuttiin luomaan ultralujaa betonia, jonka mikrorakenne optimoitiin siten, että eri partikkeleiden raekoot muodostavat täydellisesti jatkuvan rakeisuuskäyrän. Betonimassan tiheys on siis maksimaalinen. RPC hyödyntää hienon silikajauheen pozzolaanisia ominaisuuksia yhteistoiminnassa ominaisuuksiltaan erinomaisen Portland-sementin kanssa, ja sen energian absorbointikyky on lähes sama kuin metalleilla. RPC saavuttaa 200 MPa:n puristuslujuuden, ja mikäli betoniin lisätään vielä teräskuituja, voidaan veto-
lujuudessaakin päästä 50 MPa:iin asti (Emerging construction technologies, 2000).

Tämä diplomityö koostuu kahdesta osiosta, jotka ovat suppeahko kirjallisuustutkimus sekä laajempi kokeellinen osa. Kirjallisuustutkimusosiossa käsitellään lyhyesti erikoislujaa betonia materiaalina ja betonin muodonmuutosominaisuuksia eli kutistumista ja virumista. Muodonmuutoksia käsitellään sekä betonin ilmiönä yleensä että myös korkealujuusbetonin ja erikoislujan betonin erityispiirteet huomioon ottaen. Työ painottuu kokeelliseen osaan, jossa tarkastellaan kolmelle erilaiselle erikoislujalle betonille suoritettuja kutistuma- ja virumakokeita sekä kyseisten betonien käyttöä erilaisissa hybridirakenteissa yhdessä tavanomaisen betonin kanssa. Tällaisista kahden erilujuuksisen betonin muodostamista hybridirakenteista ei ole löydettävissä kirjallisuuslähteitä, joten niitä ei käsitellä kirjallisuusosiossa. Yksi oleellisimmista

kysymyksistä hybridirakenteiden käytössä on kuitenkin juuri eri betonien erilaisten kutistuma- ja virumaominaisuuksien vaikutus rakenteen kestävyYTEEN, joten kirjallisuus- osio antaa jonkinlaista valmiutta tämänkin asian pohtimiseen.

2 ERIKOISLUJAN BETONIN OMINAISUUDET JA KÄYTTÖ

2.1 ERIKOISLUJAN BETONIN KOOSTUMUS JA TYYPILLISET OMINAISUUDET

Erikoislujalla betonilla tarkoitetaan betonia, jonka lujuus on merkittävästi korkeampi kuin tavallisella korkealujuusbetonilla. Käytännössä tämä tarkoittaa, että puristuslujuus ylittää 150 MPa. Laboratorio-olosuhteissa on päästy yli 800 MPa:n lujuuksiin, kun kovettuvaa betonia on kuormitettu ja sen jälkeen lämpökäsitelty. Erikoislujalle betonille ovat ominaisia koostumus, joka sisältää korkean määrän sementtiä ja silikaa, alhainen vesi-sideainesuhde sekä runkoaineen pieni maksimiraekoko. Se onkin hyvin homogeenista juuri siksi, että siinä ei ole ollenkaan karkeaa runkoainetta, vaan maksimiraekoko on tavallisesti alle 600 µm. Erikoislujan betonin tyypillinen koostumus näkyy taulukossa 1.

Taulukko 1. Erikoislujan betonin tyypillinen koostumus (Cwirzen et al., 2006).

Sementti	Silika	Hiekka	Hieno filleri	Tehonotkistin	Teräskuidut	Vesi- sideainesuhde
1	0,25-0,3	0,8-1,1	0,2-0,4	0,016-0,05	0,1-0,3	0,15-0,22

Erikoislujan betonin ominaisuuksien kannalta on erittäin merkityksellinen myös sen tasainen rakeisuusjakauma. Tämä tarkoittaa sitä, että betonin koostumus pyritään rakentamaan materiaaleista, jotka yhdessä muodostavat jatkuvan rakeisuuskäyrän. Esimerkiksi kvartsia voidaan käyttää mikrofillerinä täyttämään sementti- ja silikapartikkeleiden väliset aukot, jolloin saadaan tasainen, tiiviiksi pakkautuva seos, jonka työstettävyys- ja lujuusominaisuudet ovat paremmat kuin ilman kvartsia. Pozzolaaninen seosaine, kuten silika, puolestaan parantaa betoniseoksen ominaisuuksia reagoimalla kalsiumhydroksidin (Ca(OH)₂) kanssa ja toimimalla fillerinä. Silikan optimaalinen määrä erikoislujassa betonissa on 25-30 % sementin määrästä, jotta nämä kaksi tehtävää täyttyvät. (Ma et al., 2002a)

Betonin ominaisuuksiin vaikuttavat sementtimatriisi, runkoaine ja näiden välinen tila. Pienentämällä vesi-sideainesuhdetta ja lisäämällä betoniin pozzolaanisia lisäaineita, kuten silikaa, saadaan vähennettyä huokoisuutta ja muokattua matriisin mikrorakennetta. Korkealujuusbetonilla vesi-sideainesuhde on yleensä 0,28-0,38 ja erikoislujalla betonilla jopa alle 0,2 (Ma et al., 2002b). Erikoislujan betonin vesimäärä on niin pieni ja sideaineen määrä suhteessa runkoaineeseen niin suuri, että suuri osa sementistä jää hydratoitumatta. Vesi riittää kuitenkin yhtenäisen sementtigeelin muodostumiseen, ja koska hydratoitumaton sementti on lujempaa kuin itse betoni, se toimii hyvänä runkoaineena. Runkoaineen pienellä raekoolla puolestaan saavutetaan sementtigeelin suurempi tartuntapinta-ala sekä yksittäisen runkoainepartikkelin pienempi todennäköisyys halkeamiseen tai muuhun vastaavaan virheeseen. (Tulimaa, 2005)

Tiivis mikrorakenne johtaa korkean lujuuden lisäksi myös muihin rakentajia miellyttäviin ominaisuuksiin. Koska erikoislujalla betonilla on alhainen huokoisuus ja se on hyvin vesi- ja ilmatiivistä, haitallisten aineiden, kuten kloridi-ionien, imeytyminen estyy hyvin. Erikoisluja betoni kestääkin tiesuoloja ja klorideja noin sata kertaa paremmin kuin tavallinen betoni. Kapillaarihuokosten puuttuminen aiheuttaa erinomaisen pakkasenkestävyyden, sillä hyvän tiiviyn ansiosta erikoislujaan betoniin ei juurikaan pääse imeytymään vettä (Donnaes, 1998). Yhteenvedona erikoislujan betonin hyvistä ominaisuuksista voisikin todeta, että ne on saatu aikaan minimoimalla betonin "heikkoja kohtia" kuten mikrohalkeamia ja kapillaarihuokosia eli tiivistämällä betonin koostumusta ja parantamalla tartuntaa sementtigeelin ja runkoaineen välillä.

Usein erikoislujassa betonissa käytetään vahvikkeena teräskuituja, joiden pituus on 12,7 mm ja halkaisija 0,2 mm. Betonimatriisiin lisättyjen teräskuitujen tarkoitus on sitoa muita materiaaleja ja vähentää mikrohalkeilua. Ne toimivatkin kuin mikrokokoisina raudoitteina tavanomaiseen betoniin verrattuna. Erikoislujalle betonille on huomattavan korkean puristuslujuuden sekä hyvän taivutuslujuuden lisäksi ominaista vetolujuus, joka on merkittävästi suurempi kuin tavanomaisella betonilla. Erikoisluja betoni kestää kuormaa sekä ennen että jälkeen halkeamisen syntymisen, mikä johtuu juuri mikrotasolla vaikuttavien teräskuitujen kyvystä kestää kuormitusta vielä halkeamien ilmaantumisen jälkeen. Tästä on hyötyä suunnittelussa juuri siksi, että varsinaisia raudoitteita voidaan vähentää. On myös koetuloksia siitä, että vetolujuutta voidaan

parantaa sopivalla jälkihoidolla (Harris et al., 2005). Taulukossa 2 on esimerkkejä erikoislujan betonin lujuus- ja kestävyysominaisuuksista.

Taulukko 2. Esimerkki erikoislujan betonin materiaaliominaisuuksista (Perry et al., 2004).

LUJUUSOMINAISUUDET	
Puristuslujuus	120 - 150 MPa
Taivutuslujuus	15 - 25 MPa
Kimmokerroin	45 - 50 GPa
KESTÄVYYSOMINAISUUDET	
Jäädytys/sulatus (300 syklin jälkeen)	100 %
Suolarasitus (jäännöksen määrä)	< 60 g/m ²
Kulutuskestävyys (suhteellinen tilavuudenmuutosindeksi)	1.7
Hapenläpäisevyys	<10 ⁻²⁰ m ²
Cl- läpäisevyys (kokonaiskuorma)	< 10 C
Karbonatisoitumissyvyys	< 0.5 mm

Erikoislujan betonin erityisen tiivis mikrorakenne, joka saa aikaan hyvät kestävyysominaisuudet, voi kuitenkin aiheuttaa ongelmia palonkestävyyden kannalta. Andranden ja Alonson (2004) tutkimuksissa betonit altistettiin useille eri kuumuuksille 700 asteeseen saakka. Kun lämpötila oli yli 600 astetta, betonin huokoisuus kasvoi yli kaksinkertaiseksi, mikä perusteltiin mikrorakenteen muutoksilla ja mikrorakenteiden muodostumisella. Kokonaisuudessaan palonkestävyys oli korkeampi erikoislujalla ja korkealujuusbetonilla tavanomaiseen betoniin verrattuna.

2.2 LÄMPÖKÄSITTELY ERIKOISLUJAN BETONIN JÄLKIHOITONA

Erikoislujien betonien jälkihoitona käytetään usein lämpökäsittelyä, jonka vaikutus korkean lujuuden saavuttamiseksi ja muiden ominaisuuksien parantamiseksi on oleellinen. Lämpökäsittelyn tavoitteena on nopeuttaa kemiallisia reaktioita ja parantaa reaktioiden tehostumisen kautta betonin lujuutta. Lämpökäsittelyllä saadaan hydrataatioreaktiot nopeutumaan ja sementti myös hydratoituu lämmössä pidemmälle kuin normaalijälkihoidossa. Lisäksi kovettuvan betonin vesihöyryn paine nousee, jolloin myös geelihuokosten adsorboitunut vesi osallistuu hydrataatioon. Lämpökäsittelyllä ikään kuin nopeutetaan ja saatetaan loppuun koko betonin

"valmistumisprosessi", joten käsittelyn jälkeen betonissa ei juurikaan enää tapahdu fysikaalisia muutoksia, kuten kutistumista. (Tulimaa, 2005)

Lämpökäsittelyä käytetään parantamaan erikoislujan betonin mikrorakennetta ja mekaanisia ominaisuuksia. Koekappaleita lämpökäsitellään yleensä 90 ja 450 asteen välillä 24 tai 48 tuntia valun jälkeen. Käsittelyn kesto vaihtelee 24 tunnin ja yhden viikon välillä. Lämpökäsittelyn pääasiallinen vaikutus on hydrataation kiihtyminen ja silikan sekä hienojen lisäaineiden pozzolaanisen reaktion paraneminen. (Cwirzen et al., 2006)

Lämpökäsittelyn vaikutuksista betonin fysikaalisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin on tehty paljon tutkimuksia. Zanni et al. (1996) saivat tutkimuksissaan selville, että silikan reagoiminen riippuu paljolti lämpötilasta ja käsittelyn kestosta. Lämpötilan kasvu 90 asteesta 250 asteeseen nosti pozzolaanista aktiivisuutta 15 %:sta 70 %:iin. Kun betonissa oli kvartsijauhetta, yhteys pozzolaaniseen aktiivisuuteen oli havaittavissa lämpötilan ylittäessä 200 °C ja keston 48 tuntia. Kvartsin pozzolaanista aktiivisuutta ei havaittu 90 °C lämmössä vielä kahdeksan tunnin jälkeen, mutta 40 tunnin jälkeen aktiivisuusaste oli kasvanut 40 %:iin. Hydrataatioaste kasvoi 10 %:sta 25 %:iin kahdeksan ja 48 tunnin välillä, mikä on enemmän kuin 28 vuorokauden jälkihoidossa 20 °C:ssa. Cheyrezy et al. (1995) saivat tutkimuksissaan samankaltaisia tuloksia. He havaitsivat, että erikoislujan betonin hydrataatioaste vaihteli 40 % ja 60 % välillä, ja lämpökäsittely paransi sitoutuneen veden määrää. He huomasivat myös, että lämpökäsittely vaikutti huokoisuuteen. Erikoislujan betonin alhaisin huokoisuus saavutettiin, kun lämpötila oli 150-200 °C ja kappaleet olivat paineen alla. Paineen vaikutus ilmenee lähinnä ilmahuokosten vähenemisenä ja ylimääräisen vapaan veden poistumisena.

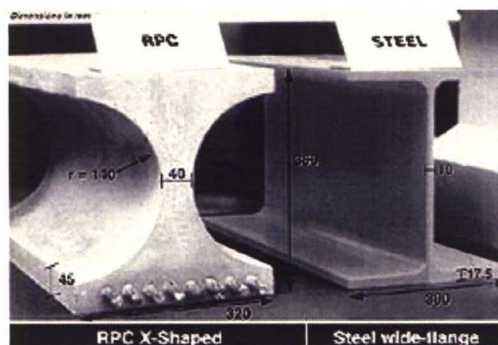
2.3 ITSETIIVISTYVYYS

Koska yksi erikoislujan betonin erityisistä ominaisuuksista on se, että siitä voidaan tehdä itsetiivistyvää, käsitellään tässä lyhyesti itsetiivistyvän betonin tunnusmerkkejä. Itsetiivistyvällä betonilla (IT-betonilla) tarkoitetaan betonia, joka koostumuksensa ansiosta tiivistyy painovoiman vaikutuksesta itsestään, ja täyttää muotin ja raudoitukset ilman mekaanista tärytystä homogeenisuuttaan menettämättä. Itsetiivistvyys saavutetaan esimerkiksi uuden sukupolven tehonotkistimilla ja alle 0,125 mm:n kokoisen runko- ja sideaineen määrää lisäämällä.

Itsetiivistyvää betonia käytetään nykyisin eniten tavallisten rakenteiden betonoinnissa, kun betonointia halutaan nopeuttaa tai työympäristöä parantaa. Lisäksi IT-betoni on tietysti erinomaisen sopivaa vaikeasti valettavien tai tiivistettävien rakenteiden betonointiin. Itsetiivistyvän, kuten erikoislujankin, betonin materiaalikustannukset kohoavat suuremmiksi kuin tavanomaisella betonilla, mutta sopivissa tilanteissa käytettynä sen käytöstä saatava hyöty kompensoi taloudelliset haitat ilman epäilystään. Itsetiivistyvän betonin tunnusmerkkeinä voidaan pitää esimerkiksi leviämisen osalta 600-850 mm ja T50-ajan osalta 2-15 s (Mannonen et al., 2004).

2.4 ERIKOISLUJAN BETONIN KÄYTÖN ETUJA JA HAITTOJA

Erikoislujaa betonia on käytetty kahdessa valtatieosassa Ranskassa sekä kolmessa jalankulkusillassa Kanadassa, Etelä-Koreassa ja Japanissa. Myös Yhdysvalloissa on alettu käyttää erikoislujaa betonia siltojen rakentamisessa. Erikoislujalla betonilla siltarakenteet voidaan tehdä huomattavasti ohuemmiksi ja samalla myös muita materiaaleja tarvitaan vähemmän. Erikoislujan betonin lujuus mahdollistaa esimerkiksi sillan kannatinpalkkien teon vähemmästä materiaalista. Myöskin siltaelementtien valmistuksessa saavutetaan huomattavia etuja: elementit ovat kevyempiä ja ne on helpompi kuljettaa työmaalle ja asentaa paikoilleen. Näin säästetään aikaa ja vähennetään työvoimakustannuksia. Erikoislujabetoni toimii parhaiten juuri sillan kannattimissa ja kansissa, sillä nämä osat voidaan tehdä kevyemmiksi ja ohuemmiksi vähemmällä betonilla (Focus, November 2004). Calgaryssa puolestaan rakennettiin syksyn 2003 ja talven 2004 aikana maailman ensimmäinen erikoislujasta betonista rakennettu rautatieasema. Esimerkiksi aseman 24 suojakatosta ovat kooltaan 5,1 m x 6 m ja vain 20 mm paksuja (Perry et al., 2004). Kuva 1 havainnollistaa erikoislujan betonin ja teräksen vertailukelpoisuutta.



Kuva 1. RPC-palkit ovat samankokoisia kuin teräspalkit. (Dauriac, 1997)

Erikoislujan betonin edut ovat huomattavat, mutta sen laajemman käytön suurimpana hidasteena ovat sen kustannukset. Koska erikoisluja betoni on suhteellisen uusi materiaali, sen käyttö on vielä rajoittunut vain muutamiin kohteisiin ja hinta pysynyt korkeana juuri siksi, että se mielletään erikoistuotteeksi (Harris et al., 2005). Donnaesin (1998) mukaan erikoislujan betonin keskimääräinen hinta on 800-1000 €/m³ eli jopa noin 5-10 kertaa enemmän kuin tavanomaisen raudoitetun betonin hinta. Siitä huolimatta erikoislujaa betonia voidaan pitää kilpailukykyisenä ratkaisuna, kun otetaan huomioon sen arkkitehtuurille ja suunnittelulle tarjoamat edut. Kustannuksia pohdittaessa on huomioitava, miten paljon erikoislujan betonin käyttö helpottaa itse rakenteen suunnittelua, kun ei tarvitse huomioida esimerkiksi raudoitteita. Ja onhan selvää, että jo raudoitteiden poisjäänti säästää paljon rakennuskuluja. Säästöä syntyy myös rakennusajassa sekä työvoimakustannuksissa. Lisäksi erikoislujalla betonilla rakenteista voidaan tehdä kevyempiä, jolloin myöskään perustusten ei tarvitse olla yhtä massiivisia kuin tavanomaista betonia ja raudoitteita käytettäessä. Vähemmän massiivisten rakenteiden käyttö puolestaan lisää myös rakennusten käyttöpinta-alaa (Donnaes, 1998). Hinnan odotetaan siis vähitellen laskevan, kun erikoislujan betonin käyttö tulee teollisuudelle tutummaksi ja rakenteiden suunnittelu ja valmistaminen erikoislujan betonin ominaisuuksien mukaan yleistyy. Samalla kustannuksia säästyy koko rakenteen elinkaareltä, sillä tavanomaiseen betoniin verrattuna erikoisluja betoni soveltuu hienosti hyvinkin rasittaviin olosuhteisiin läpäisemättömyytensä ja kestävyytensä ansiosta. (Harris et al., 2005)

Hinnan lisäksi muita ongelmia erikoislujan betonin käytössä ovat pitkä sekoitusaika ja sekoittimelle kohdistuvat vaatimukset. Lisäksi se soveltuu paremmin esivalettuihin rakenteisiin kuin paikallavaluun. Valua tosin helpottaa erikoislujan betonin itse-tiivistyvyys, jonka ansiosta tärytystä tarvitaan vain vähän tai ei ollenkaan. Erityistä huomiota vaativat muottityö ja jälkihoito, sillä erikoisluja betoni kutistuu jo varhaisessa vaiheessa ja muottien pitää sallia kutistuminen rajoittamatta sitä. (Harris et al., 2005)

Erikoisluja betoni tarjoaa rakentamiselle uusia mahdollisuuksia verrattuna tavanomaisen betonin käyttöön. Korkean lujuuden ansiosta rakenteista voidaan tehdä ohuita, kustannukset vähenevät ja rakennusten käyttöpinta-ala lisääntyy. Lisäksi säästöjä syntyy sementin ja runkoaineen määrissä. Erikoislujat rakenteet ovat myös luotettavia, sillä ne kestävät tavanomaista betonia paremmin esimerkiksi maanjäristyksiä tai muita ylikuormittavia olosuhteita. Raudoitusten poisjäänti mahdollistaa rakenteiden vapaan

muotoilun lähes mielikuvituksen rajoissa sekä vähentää työvoimakustannuksia. Erinomainen kulutuksenkestävyys kasvattaa huomattavasti esimerkiksi siltojen tai tehdastilojen lattioiden käyttöikää, ja loistava korroosionkestävyys mahdollistaa betonin säilymisen jatkuvasti kosteissa olosuhteissa ja suoloille altistuneena. Valmiin betonituotteen pinta voidaan vielä viimeistellä hyvin siistiksi karkean runkoaineen puuttumisen ansiosta. Erikoislujan betonin ehkä huonoin ominaisuus on heikko taivutusvetolujuus, mutta siihenkin voidaan vaikuttaa lisäämällä betoniin teräskuituja, jolloin siitä saadaan vertailukelpoista joidenkin metallien kanssa. (Dauriac, 1997)

2.5 ERIKOISLUJAN BETONIN KÄYTTÖ MAAILMALLA

Markkinoilla olevia erikoislujia betoneita ovat muun muassa Eiffagen kehittämä BSI (Beton Special Industri), johon pohjautuen kehitettiin yhteistyössä Sikan kanssa Ceracem-tuotemerkin itsetiivistyvät erikoislujat betonit, erilaiset Ductal-tuotemerkin betonit, mukaan lukien RPC, joita Bouygues ja Lafarge markkinoivat, sekä BVC jonka kehittivät Vicat ja Vinci.

Ensimmäinen tutkimus erikoislujasta betonista tehtiin Bouyguesissa vuosina 1990-1995 RPC:stä. Maailman ensimmäinen tästä erikoislujasta betonista tehty rakenne oli Sherbrooken jalankulkusilta Quebecissa, joka rakennettiin 1997. Silta on jänneväliltään 60 m, esivalettu ja esijännitetty, ja sen kansi on 30 mm paksu. Ensimmäiset teollisuudessa käytetyt sovellukset olivat BSI:stä ja Ductalista vuosina 1997 ja 1998 valmistetut palkit Cattenomin ja Civauxin voimalaitoksissa. Tällöin oli hyötyä erikoislujan betonin erinomaisista kestävyysominaisuuksista, keveydestä ja pitkäikäisyydestä teräkseen verrattuna. Maailman ensimmäiset valtatie sillat erikoislujasta betonista rakennettiin vuosina 2000-2001 Valencessa BSI:stä Eiffage Constructionin toimesta. Vuosina 2001-2002 rakennettiin jalankulkusilta Han-joen yli Etelä-Koreassa ja vuoden 2002 lopussa Sakata Mirain jalankulkusilta Japanissa 50 metrin jännevälillä. Shawnessyn raitiotieasema Calgaryssa Kanadassa rakennettiin kokonaan Ductalista. Vuoden 2003 lopussa alettiin rakentaa Australian Shepherdissä tiesiltaa. Yksi uusimmista erikoislujan betonin sovelluksista on Ranskassa Millaun viaductin tulliportti, jonka katto on kuin valtava kaarelle taitettu paperi, 98 m pitkä ja 28 m leveä. Lisäksi erikoislujasta betonista on tehty monia muita yksittäisiä rakenneosia eri puolilla maailmaa. (Resplendino, 2004)

Ensimmäiset ranskalaiset suositukset erikoislujille betoneille julkaistiin vuonna 2002. Suositukset laadittiin 10 vuoden tutkimustyön sekä toteutetuista käytännön sovelluksista saatujen kokemusten perusteella. (Resplendino, 2004)

3 BETONIN KUTISTUMINEN JA VIRUMINEN

3.1 KUTISTUMATYYPIT

Betonin viruma ja kutistuma ovat yhdet monimutkaisimmista materiaalien muodonmuutosmekanismeista. Niistä on tehty monia teorioita, jotka voidaan karkeasti jakaa kolmeen eri luokkaan, joiden erot liittyvät lähinnä hydratoituneeseen sementtigeeliin. Yksi teorioista keskittyy lähinnä veden liikkeisiin geelirakenteessa, toisen mukaan virumamekanismiin liittyy rakenteellisia muutoksia CSH-geelissä ja kolmas käsittelee aktivaatioenergiaa (Penttala ja Rautanen, 1990). Eri kutistumamekanismeja on monia, muun muassa kuivumiskutistuma, autogeeninen kutistuma tai plastinen kutistuma, joista kaikki ovat suunnittelijoille haasteita. Erityisesti autogeenisen kutistuman ja sisäisen kuivumisen vähentäminen on tärkeä tutkimusalue. Betonin kutistumisen tutkimisen ja ehkäisemisen merkitys liittyy oleellisesti kutistuman aiheuttamaan rakenteen halkeiluun, sillä halkeamat vaikuttavat betonin puristuslujuuteen, muodonmuutoksiin ja ulkonäköön.

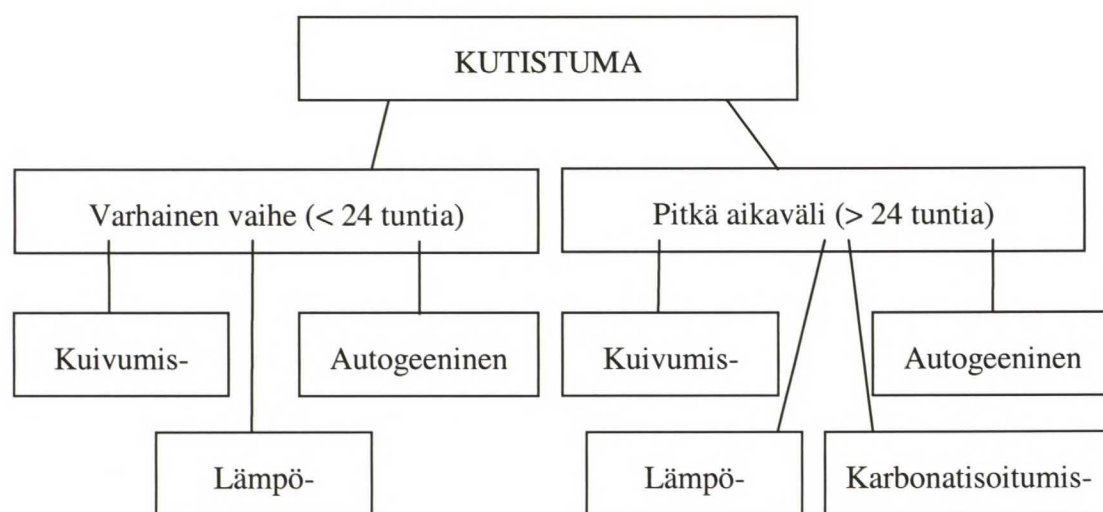
Kutistuminen vaikuttaa halkeamiin siten, että se suurentaa kuormituksen aiheuttamaa jännitystä betonissa ja siten myös kuormituksen mahdollisesti aiheuttamien halkeamien kokoa. Eli jos halkeamien koko ennakoidaan vain rakenteen kuormituksen perusteella, ovat ne todellisuudessa kutistuman vuoksi suurempia. Jos betonirakenne on kiinnitetty molemmista päistään tukevaan rakenteeseen, kutistuma aiheuttaa siihen jännityksiä ja jos jännitykset ovat tarpeeksi suuria, rakenne voi halkeilla. Toisaalta raskaasti raudoitettussa rakenteessa raudoitteet voivat estää normaalin kutistumisen ja siten aiheuttaa jännityksiä, jotka johtavat halkeamien syntyyn. (CEB 1985)

Kun vesi poistuu huokoisesta materiaalista, joka ei ole täysin jäykkää, materiaali luonnollisesti supistuu. Tällaista veden poistumista tapahtuu sekä tuoreessa että kovettuneessa betonissa. Tilavuudenmuutos voi kuitenkin olla myös paisumista. Jos kosteuden kulku betoniin on estetty, betoni kutistuu, mutta jos betoniin pääseeikin imeytymään lisää kosteutta, hydrataation jatkuminen aiheuttaa betonin paisumisen.

Betonikappaleilla ajan myötä poistuneen veden määrä on riippuvainen kappaleen koosta. Teoriassa lopullinen kutistuma ei kuitenkaan ole riippuvainen betonirakenteen koosta, mutta käytännössä kutistuma on pienempi isoissa kappaleissa. Rakenteen muodon vaikutus kutistumaan on sen sijaan toissijainen. (Neville, 1995)

Betonin eri kutistumistyyppit (Aïtcin, 1998):

- Plastinen kutistuma kehittyy tuoreen betonin pinnalla kuivumisen seurauksena.
- Autogeeninen kutistuma, jota myös kutsutaan kemialliseksi kutistumaksi, syntyy sementin hydratoituessa.
- Kuivumiskutistuma johtuu kovettuneen betonin vedenpuutteesta, kun sen sisäinen kapillaarivesi haihtuu.
- Lämpökutistuma johtuu betonin lämpötilan laskusta.
- Karbonatisoitumiskutistuma johtuu kalsiumhydroksidikiteiden liukenemisestä. Sitä edesauttaa myös karbonatisoitumisen eteneminen C-S-H:n dehydraatioon.



Kuva 2. Betonin kutistumatyypit (Holt, 2001).

3.1.1 Autogeeninen kutistuma

Autogeeninen kutistuma on sementtipastan tilavuuden pienenemistä alkukovettumisen jälkeen eli kemiallisen kutistuman seurauksena. Kemiallinen kutistuma tarkoittaa sitä, että hydratoituneen sementtipastan tilavuus on pienempi kuin hydratoitumattoman sementin ja veden yhteenlaskettu tilavuus. Se on korkealujuusbetonin kannalta oleellisin kutistumamuoto, ja sen vakavin seuraus on sementtipastan halkeilu. Tämän vuoksi autogeenisen kutistuman merkitys on suuri myös pakkasenkestävyyden kannalta. (Cwirzen, 2004) Autogeenisen kutistuman mittauksen aloitti Jesser (1927) 1920-luvun lopulla ja itse termi autogeeninen kutistuma määritettiin 1934 (Lynam, 1934).

Autogeeninen kutistuma syntyy betonin sisällä, kun vesi vetäytyy kapillaarihuokosista sementin hydrataatiossa. Kutistumista kuitenkin rajoittavat jo aiemmin hydratoitunut jäykkä sementtigeeli sekä runkoainepartikkelit. Autogeeninen kutistuma lisääntyy lämpötilan kasvaessa ja kun sementtimäärä on suuri. Myös sementin hienoudella ja C_3A ja C_4AF -pitoisuuksilla on mahdollisesti kutistumaa lisäävää vaikutusta, mutta jos osa sementistä korvataan lentotuhkalla, autogeeninen kutistuma pienenee. Autogeeninen kutistuma on tavanomaisella betonilla suhteellisen pieni, noin 40×10^{-6} m/m kuukauden iässä ja noin 100×10^{-6} m/m viiden vuoden kuluttua, jolloin sitä ei ole aina syytä erottaa kuivumiskutistumasta. Sen sijaan hyvin alhaisella vesi-sideainesuhteella eli erikoislujalla betonilla se on korkea. Esimerkiksi betonilla, jonka vesi-sideainesuhde on 0,17, on todettu 700×10^{-6} m/m autogeeninen kutistuma. (Neville, 1995)

Normaalisti betonin ollessa kosteassa ympäristössä ei synny tyhjiä kapillaareja, koska ne ovat täyttyneet vedellä, eikä siis myöskään autogeenista kutistumaa eikä halkeamia. Kuitenkin jos betonin vesi-sideainesuhde on hyvin alhainen, osa huokosista saattaa olla hydrataatioprosessissa erillään ulkoisesta vedenlähteestä, jolloin autogeenista kutistumaa voi kehittyä kosteissakin olosuhteissa eli jälkihoidosta huolimatta (Aïtcin, 1998). Erikoislujalla betonilla on suuren sementtimäärän takia sementin hydrataatiosta aiheutuva kutistuma suurempi kuin veden absorptiosta johtuva paisuminen ja siksi erikoislujaa betoni kutistuu vaikka se olisi vedessä. Tavanomaisella betonilla autogeeninen kutistuma on noin 40-100 $\mu\text{m}/\text{m}$. (Gowripalan et al., 2005)

Gowripalanin et al. (2005) tutkimuksen mukaan voidaan todeta, että suurin osa lämpökäsitellyn erikoislujan betonin kutistumasta tapahtuu lämpökäsittelyn aikana. Suunnilleen 70-75 % kokonaiskutistumasta, joka oli tutkimuksessa noin 400 $\mu\text{m}/\text{m}$,

tapahtui tänä aikana. Loput 25-30 % kokonaiskutistumasta ovat joko kuivumiskutistuman tai jatkuneen autogeenisen kutistuman aiheuttamaa. Lämpökäsittelimättömillä kappaleilla kutistuma kehittyi nopeasti varhaisessa vaiheessa ja jatkoi kasvuaan kiihtyvällä nopeudella. Noin 60 % kokonaiskutistumasta tapahtui ensimmäisen kahden kuukauden aikana, ja vuoden jälkeen kutistuminen oli pientä. Pitkän aikavälin (200-500 vuorokautta) jälkeen oli kutistuman kannalta merkityksetöntä, olivatko kappaleet lämpökäsiteltyjä vai eivät. Erikoislujan betonin virumista lämpökäsittelyn havaittiin pienentävän huomattavasti.

Dilgerin et al. (1996) tutkimuksessa korkealujuusbetonin autogeeninen kutistuma oli hyvin korkea ja kehittyi nopeasti, mutta loppui noin 10 viikossa. Heidän mukaansa autogeeninen kutistuma on ensimmäisten päivien aikana suurempi matalamman vesi-sideainesuhteen betonille, mutta pitkän aikavälin kutistuma jää sille pienemmäksi. Lopulliseen muodonmuutokseen vesi-sideainesuhteella näyttäisi olevan vain vähän vaikutusta. Jälkihoito vedellä usean päivän ajan vähensi merkittävästi alhaisen vesi-sideainesuhteen korkealujuusbetonin kuivumiskutistumaa.

Tazawan ja Miyazawan (1996) mukaan autogeenisen kutistuman rajoittaminen johtaa suureen jännitysrasitukseen korkealujuusbetonissa varhaisessa iässä. Autogeeninen kutistuma voi olla suurempi tekijä plastisen kutistuman kehittymisessä kuin kosteuden haihtuminen, sillä plastinen kutistuma voi syntyä, vaikka betonin pinta olisi kostea. Heidän mukaansa autogeeninen ja lämpökutistuma pitäisi laskea yhteen, jotta saadaan betonin kokonaisvenymä, ja betonin sisäisten jännitysten syntymiseen vaikuttavat autogeeninen ja lämpökutistuma, eikä niiden määrä kasva kuivumiskutistuman vaan autogeenisen kutistuman seurauksena.

3.1.2 Kuivumiskutistuma

Kuivumiskutistuma johtuu betonin veden vähenemisestä haihtumisen seurauksena. Autogeenista kutistumaa tapahtuu kaikkialla betonissa, mutta kuivumisprosessi alkaa betonin pinnalta ja etenee syvemmälle. Syvyys, jonne kuivuminen ulottuu, riippuu sementtipastan mikrorakenteesta. Tärkein tekijä on ympäröivän ilman ja kapillaarien suhteellinen kosteus. Kuivumisen aikana vettä poistuu yhä pienemmistä ja pienemmistä huokosista. Haihtuminen rajoittuu koko ajan enemmän, kun kapillaarivoimat kasvavat. Kapillaarivoimat ovat kääntäen verrannolliset kapillaarien halkaisijaan. (Aïtcin, 1998)

Kuivumisen edetessä adsorboitunut vesi poistuu, jolloin rajoittamattoman hydratoituneen sementtigeelin tilavuuden muutos on suunnilleen sama kuin geelipartikkeleiden pinnalta poistuvan yhden molekyylin paksuisen vesikerroksen tilavuus. Näin ollen täydellisessä kuivumisessa sementtigeelin kutistuma olisi 10000×10^{-6} m/m luokkaa. Geelipartikkelin koko vaikuttaa siis kutistumaan siten, että mitä hienojakoisempi on betonin rakenne, sitä enemmän se kutistuu. Kutistuman perustekijät löytyvätkin geelin fysikaalisista ominaisuuksista, eivät sen kemiallisesta tai mineraalisesta luonteesta. (Neville, 1995)

Aïtcin (1998) kuvaa kovettuneen betonin kutistumaa seuraavalla yhtälöllä:

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{lämpö} + \varepsilon_{autog} + \varepsilon_{kuiv} \quad (1)$$

Kokonaiskutistumaa ε_{tot} laskettaessa oletetaan, että lämpökutistuma $\varepsilon_{lämpö}$ on positiivinen, mikäli betoni jäähtyy, ja negatiivinen, mikäli lämpötila nousee. Autogeeninen kutistuma ε_{autog} voi olla nolla, mikäli betoni on vedessä, ja kuivumiskutistuma ε_{kuiv} voi olla nolla, mikäli betoni on peitetty vettä läpäisemättömällä kalvolla eli vesi ei poistu betonista. Autogeeninen ja kuivumiskutistuma eivät kuitenkaan voi olla nollia yhtä aikaa, paitsi jos betoni on aina vedessä. Kuitenkin tällainen tilanne on yleensä mahdoton, koska jälkihoito on jossain vaiheessa lopetettava. (Aïtcin, 1998)

Aïtcinin (1998) mukaan korkealujuuksisella betonilla, jolla vesi-sideainesuhde on alhainen, autogeeninen kutistuma kehittyy hyvin nopeasti ja tehokkaasti tavanomaiseen betoniin verrattuna. Sen sijaan kuivumiskutistuma kehittyy hitaammin, koska korkealujuusbetonin huokoset ovat niin hienoja ja koska vesi on jo poistunut niistä autogeenisen kutistumisen aikana. Toisin sanoen korkealujuusbetonilla kutistuminen aiheutuu ensisijaisesti autogeenisestä kutistumasta, kun taas tavanomaisen betonin kutistuman aiheuttaa pääasiassa kuivuminen. Mitä alhaisempi vesi-sideainesuhde, sitä korkeampi autogeeninen kutistuma.

3.1.3 Plastinen kutistuma ja paisuminen

Vettä voi poistua betonista myös haihtumalla tuoreen betonin pinnalta tai imeytymällä alla olevaan kuivaan betoniin tai maahan. Tätä ilmiötä kutsutaan plastiseksi kutistumaksi. Plastisen kutistuman suuruus riippuu lämpötilasta, ympäristön

suhteellisesta kosteuspitoisuudesta ja tuulen nopeudesta. Jos haihtuvan veden määrä ylittää betonin pinnalle nousevan veden määrän ja ero on suuri, betonin pinta voi halkeilla. Näin voi käydä esimerkiksi valmistettaessa betonia hyvin lämpimissä olosuhteissa tai kuivalle maaperälle tai betonin altistuessa auringolle ja tuulelle. Plastista kutistumaa ja sen myötä halkeilua voi tapahtua myös, jos betonin lämpötila on ympäröivää lämpötilaa korkeampi, vaikka ympäröivän ilman suhteellinen kosteus olisi korkea. Halkeilu voidaan estää suojaamalla betoni välittömästi valun jälkeen kovettumisen ajaksi, jotta vettä ei pääse haihtumaan.

Halkeamia syntyy myös, jos betonin vapaa kutistuminen estyy syystä tai toisesta, esimerkiksi raudotteiden tai suurien runkoainepartikkeleiden takia. Plastinen kutistuma on yleensä sitä suurempi, mitä enemmän seoksessa on sementtiä, ja sitä pienempi, mitä alhaisempi on vesi-sementtisuhte. (Neville, 1995)

Kun betonia jälkihoitetaan märissä olosuhteissa, vettä absorboituu sementtigeeliin ja betoni paisuu. Paisuman tyypillinen suuruus on 6-12 kuukauden iässä 100×10^{-6} - 150×10^{-6} m/m, kun sementtimäärä on betonissa 300 kg/m^3 . Vuoden jälkeen paisumista ei juuri enää tapahdu. Paisumisen yhteydessä betonin massa yleensä lisääntyy noin prosentin verran. Massan lisääntyminen on siis suurempaa kuin tilavuuden lisääntyminen, sillä vesi täyttää hydrataatiossa syntyneen tilan. Paisumista esiintyy erityisesti syvän meren rakenteissa, sillä merivesi ja korkea paine edesauttavat paisumista. Esimerkiksi 100 m syvyydessä paisuman tilavuus saattaa olla kahdeksan kertaa suurempi kuin tavallisessa ilmanpaineessa. (Neville, 1995)

3.1.4 Karbonatisoitumiskutistuma ja lämpökutistuma

Karbonatisoitumiseen liittyy karbonatisoitumiskutistuma, joka ilmenee yleensä pinnan halkeiluna. Cwirzen (2004) kirjaa eri teorioita, joilla on selitetty karbonatisoitumiskutistumaa. Alexanderin ja Wardlawin (1959) teorian mukaan karbonatisoituminen vapauttaa vettä, joka sitten haihtuu. Ramachandran et al. (1981) osoittivat, että karbonatisoitumisen seurauksena kalsiumhydroksidikiteiden yhteys häiriintyy ionidiffuusiassa, jolloin syntyy reikiä ja kiteet vetäytyvät yhteen van der Waalsin voimien takia. Kamimuran et al. (1965) tutkimuksissa kuivumiskutistuman todettiin kasvavan karbonatisoitumiskutistuman takia keskimääräisillä kosteuspitoisuuksilla, mutta ei kosteuden ollessa 100 % tai alle 25 %. Nevillen (1995) mukaan

jälkimmäisessä kosteudessa huokosissa ei ole tarpeeksi vettä tukemaan hapon syntymistä ja 100 %:n suhteellisessa kosteudessa huokoset ovat täynnä, mikä hidastaa CO_2 :n diffuusiota sementtipastaan. Kamimura et al. (1965) selvittivät tutkimuksissaan, että kuivuminen ja sitä seuraava karbonatisoituminen aiheuttavat suurimman kokonaiskutistuman. On myös todettu, että korkealujuusbetonilla karbonatisoitumiskutistuma vähenee vesi-sideainesuhteen pienenemisen myötä ja kasvaa silikamäärän kasvamisen myötä. Karbonatisoituminen riippuu siis suurelta osin sementtipastan mikrorakenteesta ja ympäröivän ilman kosteuspitoisuudesta. 60-70 %:n suhteellinen kosteus on karbonatisoitumisen syntymiseksi optimaalisin kosteuspitoisuus. Alhaisen vesi-sideainesuhteen betoneilla on karbonatisoitumisesta todettu toisaalta, että tiiviin mikrorakenteen ansiosta karbonatisoituminen on vähäistä, mutta toisaalta, että karbonatisoituminen on sen takia mahdollista ja saattaa alentaa pakkasenkestävyyttä. (Cwirzen, 2004) Persson (1998) havaitsi, että korkealujuusbetonin karbonatisoitumiskutistuma liittyy ikään, vesi-sementtisuhteeseen sekä karbonatisoitumisen syvyyteen.

Lämpökutistumaa esiintyy varhaisessa ja myöhemmässä iässä johtuen lämmön nousuista ja laskuista sekä lämpötilan vaihtelusta rakenteen poikkileikkauksen eri kohdissa. Esimerkiksi vesi-sideainesuhde ja runkoainepitoisuus vaikuttavat kutistumaan. Lämpökutistuma on suurimmillaan ensimmäisten tuntien aikana ja vähenee kun betoni saavuttaa lujuutta. (Cwirzen, 2004)

3.1.5 Estetty kutistuminen

Kuten aiemmin luvussa 3.1.3 mainittiin, halkeilua voi aiheutua myös silloin, kun betonin vapaa kutistuminen estyy. Kutistumismuodonmuutosta voivat rajoittaa joko rakenteen ulkoiset tai sisäiset tekijät. Ulkoisia reunaehtoja ovat rakenteen tukireaktiot ja sisäisiä esimerkiksi raudoitus. Staattisesti määräämättömien betoni- ja teräsbetonirakenteiden mitoituksessa onkin aina huomioitava betonin kutistumisesta aiheutuvat rasitukset. Kun raudoitus estää vapaan kutistumisen, betoniin syntyy sekä vetorasitusta että raudoituksen puristusrasitusta, joiden seurauksena voi olla kutistumishalkeilu. Tällaisen halkeaman leveys on usein rakenteellisesti ja säilyvyysominaisuuksien kannalta merkittävä. (Penttala et al., 1986)

3.2 KUTISTUMAAN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

3.2.1 Betonin ainesosien vaikutus

On esitetty, että kutistuma on suoraan verrannollinen vesi-sideainesuhteeseen, kun v/s-suhde on välillä 0,2-0,6. Korkeammilla arvoilla ylijäämävesi haihtuu johtamatta kutistumiseen. Jos vesi-sideainesuhde on vakio ja sementtimäärää kasvatetaan, kasvaa myös hydratoituneen sementtipastan määrä, mikä puolestaan lisää kutistumaa. Jos taas vesimäärä on vakio, kutistuma ei kasva sementin määrää lisättäessä, vaan voi jopa vähetä, koska vesi-sideainesuhde pienenee ja betoni vastustaa kutistumista paremmin. (Neville, 1995)

Betonin vesimäärä vaikuttaa kutistumiseen lähinnä siten, että se vähentää runkoaineen tilavuutta. Kutistumaan vaikuttaakin koko seoksen koostumus, vaikka vesimäärä itsessään pysyisi samana. Esimerkiksi notkistimet kasvattavat kutistumaa jonkin verran, mutta huokostimilla ei ole havaittu olevan mitään vaikutusta. Lentotuhkan tai masuunikuonan lisääminen betoniin kasvattaa kutistumaa. Myös silika lisää esimerkiksi korkealujuusbetonin tai erikoislujan betonin autogeenista kutistumaa. Runkoaineen elastiset ominaisuudet vaikuttavat puolestaan betonin kutistuman määrään, sillä kutistuman ja betonin kimmomoduulin välillä on yhteys. Esimerkiksi savinen runkoaine lisää kutistumaa huomattavasti.

Betonin runkoaine rajoittaa kutistumista. Runkoaineen koko ei sinänsä vaikuta kutistuman tilavuuteen, mutta karkeammalla runkoaineella saadaan tukevampi seos, mikä johtaa alhaisempaan kutistumaan. Jos siis samalla vesi-sideainesuhteella betoniin laitetaan enemmän runkoainetta, kutistuma on alhaisempi kuin vastaavalla betonilla, jolla runkoainetta on vähemmän. Jos esimerkiksi nostetaan runkoaineen määrää betonissa 71 %:sta 74 %:iin, kutistuma vähenee noin 20 % (Neville, 1995). Toisaalta karkean runkoaineen määrää lisättäessä sementtipastaan voi syntyä enemmän mikrohalkeamia, koska sen kutistuminen rajoittuu runkoaineen takia. Vaikka autogeeninen ja kuivumiskutistuma liittyvät hydratoituneen sementtipastan vastaaviin tilavuudenmuutoksiin, ne eivät silti kehity vapaasti karkean runkoaineen muodostaman ”luurangon” takia. Tämän vuoksi kovettuneen betonin kutistuma on aina pienempi kuin pelkän hydratoituneen sementtipastan. (Aïtcin, 1998)

Pinnalla eli lähinnä muottia olevan betonin kutistuma on yleensä suurinta, sillä pintaosissa on enemmän sementtipastaa ja vähemmän karkeaa runkoainetta ja kutistuma myös pääsee kehittymään vapaammin. Korkealujuusbetonin pinnan kutistuma on vielä suurempi kuin tavanomaisella betonilla, koska siinä on enemmän sementtipastaa, mikä tekee jälkihoidon vedellä vieläkin välttämättömämmäksi.

3.2.2 Jälkihoidon merkitys

Betonin jälkihoidon tärkeimmät tavoitteet ovat mahdollisimman suuren sementtimäärän hydratoituminen sekä kutistuman pienentäminen. Kun hydrataatio sujuu parhaalla mahdollisella tavalla, saavutetaan myös korkein mahdollinen lujuus ja alhaisin läpäisevyys. Jälkihoitamaton betoni kuivuu vesi-sementtisuhteesta riippuen enemmän tai vähemmän nopeasti eikä saavuta täydellisiä lujuus- ja kestävyysominaisuuksia. Viipymättä aloitetulla jälkihoidolla voidaan myös oleellisesti vähentää kokonaiskutistumaa. Usein ajatellaan, että esimerkiksi korkealujuusbetoni kutistuu enemmän kuin tavanomainen betoni suuremman sementtimääränsä vuoksi, mutta kutistumisen kannalta vielä suurempi merkitys on jälkihoidolla. Korkealujuusbetonilla suurin osa kutistumasta on autogeenista kutistumaa, josta valtaosa voidaan eliminoida jälkihoidolla, joka aloitetaan kosteassa niin varhaisessa vaiheessa kuin mahdollista. Siinä missä vedellä tehtävä jälkihoito on tavanomaiselle betonille tärkeää, se on korkealujuusbetonille ja tietysti myös erikoislujalle betonille aivan välttämätöntä. (Aitcin, 1998)

Kun jälkihoito loppuu, betonin vesi-sideainesuhde sekä runkoaineen määrä ja tyyppi määräävät pitkälti lopullisen kutistuman. Mitä pidempään jälkihoito kestää, sen parempi. Korkealujuusbetonin kutistuman vähentämiseen noin seitsemää vuorokautta pidetään tarpeeksi pitkänä aikana, mutta ainakaan betoni ei saisi päästä kuivumaan alle kolmen vuorokauden ikäisenä. Sopiva jälkihoito tulee kuitenkin määrittää tapauskohtaisesti rakenteen koosta ja tyypistä riippuen. Hyvin suunnitellun ja toteutetun jälkihoidon ei pitäisi olla koskaan ongelma, sillä se vaatii vain vettä. (Aitcin, 1998)

Jälkihoidon vaikutuksesta kutistumaan on silti ristiriitaistakin tietoa, sillä A. M. Nevillen (1995) mukaan jälkihoito kosteassa lykkää kutistumisen alkamista, mutta kutistuman lopulliseen tilaan sillä on vain pieni vaikutus. Toisaalta kosteussäilytys aiheuttaa suuremman sementtimäärän hydratoitumisen, jolloin vähemmän kutistumista

vähentäviä sementtipartikkeleita jää betoniin, mikä voisi kasvattaa kutistumaa - toisaalta hydratoitunut sementtipasta sisältää vähemmän vettä ja lujittuu ajan myötä ja siten kestää paremmin kutistumista ja sen aiheuttamaa halkeilua. Yleisesti ottaen jälkihoidon pituus ei ole Nevillen mukaan tärkeä tekijä kutistumassa.

Niin sanotulla sisäisellä jälkihoidolla eli esimerkiksi huokoisella runkoaineella tai kemiallisilla lisäaineilla pyritään takaamaan hydrataation kannalta riittävä kosteus pidemmäksi aikaa. Sisäinen jälkihoito tulee kyseeseen erityisesti korkealujuusbetonilla ja erikoislujalla betonilla, joilla kutistuma saattaa tosiaan olla sementtimäärän ja alhaisen vesi-sideainesuhteen takia suuri, varsinkin jos ulkoinen jälkihoito epäonnistuu. Superabsorbent polymer (SAP) eli autogeenista kutistumaa vähentävä polymeeri toimii betonissa siten, että se imee itseensä kosteutta betonin valmistusvaiheessa ja luovuttaa sitä myöhemmin hydrataation edetessä. PCA Research & Technologyn mukaan on todettu, että kun SAP:a lisätään betoniin 0,3-0,6 % sementin määrästä, autogeeninen kutistuma vähenee tehokkaasti, mutta kuivumiskutistumaan sillä on vain vähäinen vaikutus. Puristuslujuuden havaittiin heikkenevän, mikä johtunee huokosista, joita kosteutensa luovuttaneet polymeeripartikkelit jättävät betoniin. Vetolujuuden todettiin kuitenkin paranevan.

3.3 BETONIN VIRUMINEN

Viruma on kutistuman ohella yksi suurimmista ongelmista betonin käytössä, sillä kutistuma ja viruma vaikuttavat yhtä lailla niin nuoren kuin vanhankin betonin ominaisuuksiin. Betonilla, jolla on korkea kutistuma, on yleensä myös korkea viruma. Kutistuman tavoin virumaan vaikuttavat monet betonin ominaisuudet, kuten vesi-sementtisuhte, ja viruminen tapahtuu betonissa nimenomaan hydratoituneessa sementtipastassa, runkoaine ei siis viru. Viruman perussy on kuitenkin yhä hieman epäselvä, mutta pääoletus on, että se johtuu kosteuden liikkumisesta betonissa sitä kuormitettaessa.

Perusvirumalla tarkoitetaan ilmiötä, joka tapahtuu kun betonia kuormitetaan vakioilmastossa. Lämpötila pysyy tällöin vakiona ja kosteuden siirtyminen betonista ympäristöön on nolla eli betonin paino on vakio. Kuivumisviruma tapahtuu kuormitettaessa betonia vakioilmassa ja lämpötilassa. Kosteuden siirtymistä betonista ympäristöön tapahtuu eli betonin paino ei ole vakio. Kutistuma ei sisälly

kuivumisvirumaan, vaan ne muodostavat yhteenlaskettuina kappaleen kokonaismuodonmuutoksen (Persson, 1998). Tosin tarkkaan ottaen kutistuma ja viruma eivät ole täysin itsenäisiä ilmiöitä, ja kutistuman todellinen osuus muodonmuutoksessa jää tällaisessa yhteenlaskussa usein liian pieneksi. Yleensä on kuitenkin ihan käytännöllistä käsitellä näitä ilmiöitä erikseen ja laskea ne yhteen kokonaismuodonmuutosta määritettäessä. (Neville, 1995)

Betonin viruma liittyy erityisesti kapillaariveden ja adsorboituneen veden liikkumiseen betonissa, veden siirtymiseen ympäristöön sekä sisäisten mikrohalkeamien syntyyn. Virumisen nopeus ja tilavuus riippuvat kovettuneen sementtipastan huokostilavuudesta ja kuormituksen aikana näissä huokosissa olevan veden määrästä. Kappaleilla, joilla on korkeampi vesisementtisuhte, on kovettuneessa sementtipastassa enemmän kapillaarihuokosia ja näin ollen enemmän kapillaarivettä, mikä johtaa korkeampaan loppuvirumaan. (Ma et al., 2005)

Erikoislujalla betonilla on puolestaan alhaiseen virumaan viittaavia ominaisuuksia: silikan ansiosta tiivis mikrorakenne, hyvin matala vesisementtisuhte ja erityisen alhainen huokoisuus. Vapaan veden määrä on vähäinen, sillä suurin osa vedestä kuluu hydrataatioon kapillaarihuokosiin jäämisen sijasta. Tavanomaisella betonilla juuri kapillaarihuokosissa oleva vesi pääsee liikkumaan helpommin kuin adsorboitunut vesi, mikä tarkoittaa sitä, että betonia kuormitettaessa kapillaarivesi liikkuu ensin ja adsorboitunut vesi vasta sitten. Erikoislujan betonin vähäinen kapillaariveden määrä ja heikko kapillaarihuokosverkosto saattaakin olla yksi syy alhaisempaan varhaisvirumaan ja hitaampaan viruman kehittymiseen erityisesti pari viikkoa kuormituksen alkamisen jälkeen. Myöhemmässä vaiheessa kovin suurta eroa ei enää ole. (Ma et al., 2005)

Erikoislujan betonin tiivis mikrorakenne myös ehkäisee veden diffuusiota betonista ympäristöön. Vain pinnan läheisyydessä oleva vesi voi diffundoitua ulos betonista, mikä on tapahtunut enimmäkseen jo ennen kuormitusta. Penttalan ja Rautasen (1990) tutkimuksen mukaan korkealujuusbetonin viruessa huokosvettä ei puristu ulos kappaleesta, vaan huokosten sisäänkäynnit supistuvat ja siten veden haihtuminen estyy, toisin kuin kutistumakappaleilla tapahtuu. Tutkimuksen mukaan korkealujuusbetonin virumismuodonmuutokset olivat 40-70 % tavanomaisen betonin virumismuodonmuutoksista.

Toisaalta erikoislujan betonin sementtipastan suuri määrä ja pieni runkoainekoko voivat johtaa korkeampaan virumaan. Siksi tavanomaiselle ja korkealujuusbetonille luodut virumamallit eivät suoraan sovellu erikoislujan betonin viruman ennustamiseen. (Ma et al., 2005)

3.3.1 Virumaan vaikuttavia tekijöitä

Nevillen (1995) mukaan useimmilla betoniseoksilla on niin, että kun nostetaan runkoaineen määrää betonissa 65 %:sta 75 %:iin, voi viruma vähentyä kymmenellä prosentilla. Rakeisuudella, maksimiraekolla ja runkoainepartikkeleiden muodolla lienee jonkinlaista vaikutusta virumaan. Runkoaineen kimmokerroin on kuitenkin tärkeimpiä virumaan vaikuttavia tekijöitä, sillä mitä suurempi kerroin on, sitä enemmän runkoaine pystyy vastustamaan virumista. Runkoaineen huokoisuuden on myös havaittu vaikuttavan, mutta koska huokoisemmilla runkoaineilla on matalampi kimmokerroin, ei huokoisuus ehkä ole itsessään merkittävä kutistumaan vaikuttava tekijä. Toisaalta huokoisuus liittyy kosteuden siirtymiseen betonissa, mikä puolestaan edesauttaa virumista. Viruman suuruuden yksiselitteinen määrittäminen tietynlaisessa betonissa on erilaisten runkoaineiden kirjon vuoksi vaikeaa, mutta jonkinlainen suuruusjärjestys eri runkoaineista valmistettujen betonien virumalle on kokeilla osoitettu. Runkoaineena esimerkiksi hiekkakivi näyttäisi olevan virumisen kannalta kestävämpi kuin vaikkapa kalkkikivi tai kvartsi.

Runkoaineen ja sementin ominaisuuksien lisäksi virumaan vaikuttavat ympäristön olosuhteet. Virumista tapahtuu sitä enemmän, mitä korkeampi on lämpötila. Tärkeä tekijä on myös betonia ympäröivän ilman suhteellinen kosteus, sillä viruma on sitä korkeampi, mitä alhaisempi on suhteellinen kosteus (Neville 1995). Penttalan ja Rautasen mukaan muutokset ympäristön kosteudessa vaikuttavat kuitenkin nopeammin kutistuma- kuin virumakappaleisiin. Paino väheni suunnilleen yhtä paljon viruma- ja kutistumakappaleilla, ja alkuviruman ja -kutistuman suuruus johtui sekä korkealujuus- että tavanomaisella betonilla pääasiassa ympäristöön haihtuvan veden määrästä.

Betonin lujuudella on merkittävä vaikutus virumiseen, ja viruman tarkasteleminen lujuuden avulla onkin huomattavasti käytännöllisempää kuin vaikka sementtityypin, vesi-sementtisuhteen tai iän avulla. Viruma on kääntäen verrannollinen betonin lujuuteen iässä, jolloin se joutuu kuormituksen alle eli virumakerroin pienenee betonin

lujuuden kasvaessa. Tämä pätee niin tavanomaiselle, korkealujuuksiselle kuin erikoislujalle betonille. (Neville 1995)

Dilgerin et al. (1996) tutkimuksen mukaan sekä perus- että kokonaisvirumaan vaikuttaa merkittävästi kuormitusikä. Kuivumisviruma on vain pieni osa kokonaisvirumasta, ja mitä aikaisempi kuormitus, sitä pienempi on sen osuus. Kuormitusikä on merkittävä tekijä viruman, etenkin perusviruman, kehittämisessä.

4 KOKEELLISEN TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Kokeellisen osan tavoitteena oli selvittää kolmen koostumukseltaan hieman erilaisen erikoislujan betonin ominaisuuksia. Kokeellinen osa koostui kahdesta itsenäisestä kokonaisuudesta, joissa molemmissa käytettiin samoja betoneita selkeän kokonaisuuden saavuttamiseksi. Työ painottuu näihin kahteen laajempaan koeohjelmaan, mutta niiden lisäksi testattiin vielä koebetoneista valmistettujen laattojen pistekuorman kestävyyttä ja verrattiin sitä kahdesta matalampilujuuksisesta betonista valmistettujen laattojen pistekuorman kestävyYTEEN. Näistä kokeista on kuitenkin kerrottu tässä työssä vain lyhyesti. Lisäksi kokeelliseen osaan kuuluivat tuoreen betonin kokeet sekä puristuslujuuskokeet.

Ensimmäisessä varsinaisessa koeohjelmassa tarkasteltiin koebetoniEN ajasta riippuvia muodonmuutosominaisuuksia kutistuma- ja virumakokeilla kahdessa eri kosteusolosuhteessa. Tämä koeosuus oli kaikkein pitkäkestoisin, sillä muodonmuutoksia seurattiin vuoden ajan. Toisena laajemman tutkimuksen aiheena oli erikoislujan ja matalampilujuuksisen betonin toimivuus samassa rakenteessa. Näitä kokeita kutsutaan tässä työssä hybridirakennekokeiksi. Hybridirakenteita testattiin taivutus- ja leikkauslujuuskokein.

Tutkimukseen valittiin kolme koostumukseltaan hieman erilaista mutta työstettävyys- ja lujuusominaisuuksiltaan samankaltaista erikoislujaa betonia rakennusmateriaalitekniikan laboratoriossa aiemmin saatujen tutkimustulosten perusteella. Kaikkien betonien materiaaleina olivat hieno hiekka, SR-sementti, hieno silika, tehonotkistin sekä vesi. Lisäksi käytettiin Kemiö-kvartsia sekä kutistumista rajoittavaa polymeeria. Betonien ominaisuuksia tutkittiin sekä lämpökäsitellyillä että lämpökäsittelemättömillä koekappaleilla. Lämpökäsittelyn ansiosta erikoislujan betonin ominaisuudet muuttuvat

oleellisesti, joten oikeastaan voitaisiin ajatella, että tässä työssä on tutkittu kuutta erilaista erikoislujaa betonia.

Tuoreen betonin ominaisuuksista määritettiin jokaisen valun yhteydessä lämpötila, ilmamäärä, T50-aika, leviämä sekä minikartiokoe. Varsinaisten koekappaleiden lisäksi kustakin tehdystä betonimassasta valettiin $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$:n kuutioita puristuslujuuden määrittämistä varten. Puristuslujuus testattiin sekä lämpökäsitellyillä että lämpökäsitlemättömillä kuutioilla.

Kokeet suoritettiin Teknillisen korkeakoulun Rakennusmateriaalitekniikan laboratoriossa kesäkuun 2005 ja kesäkuun 2006 välillä. Tämä tutkimus muodostaa oman kokonaisuutensa laboratorion laajemmasta erikoislujia betoneita käsitelleestä projektista. Tämän vuoksi koebetonit valittiin projektissa aiemmin saatuihin tuloksiin pohjautuen ja valut sekä kokeet pyrittiin suorittamaan täysin vastaavin menetelmin kuin projektissa muutoinkin oli käytäntönä.

Jokainen koeohjelma käsitellään tässä työssä omana kokonaisuutenaan aina koekappaleiden kuvauksesta koetulosten tarkasteluun. Tulosten tarkastelun yhteydessä tehdään myös johtopäätökset, sillä ne on selkeämpää esittää heti kyseisen aihealueen päätteeksi eikä vasta työn lopussa, kun koeosuuksia on useampi erilainen. Työn lopussa on yhteenveto, jossa kootaan yhteen tulosten tarkastelun ja johtopäätösten keskeisimmät ajatukset.

5 TUTKIMUKSESSA KÄYTETYT BETONIT

5.1 MATERIAALIT

Rakennusmateriaalitekniikan laboratoriossa tutkittiin syksyn 2004 ja kevään 2005 aikana betonimassan ainesosien pakkautuvuustiheyttä niin sanotulla Puntken menetelmällä. Menetelmällä testattiin erilaisia hiekan, kvartsin ja kalkkikiven yhdistelmiä sekä varsinaista betonimassaa vastaavia seoksia, joissa oli edellä mainittujen runkoaineiden lisäksi mukana myös sementtiä, silikaa ja notkistinta. Pakkautuvuuskokeissa pienessä metallikupissa olevaan kuiva-ainesten seokseen lisättiin vettä tai veden ja notkistimen seosta, ja kuppia pudotettiin kädestä tasaiselta korkeudelta pöydälle. Vettä lisättiin pieniä määriä kerrallaan ja pudottelua jatkettiin, kunnes nestettä alkoi silmin havaittuna erottua seoksesta. (Cwirzen et al., 2005)

Menetelmällä etsittiin useista hiekan, kvartsin ja kalkkikiven yhdistelmistä ne, joilla tarvittava vesimäärä oli pienin. Myös runkoaineseoksen ja sementin suhdetta muuteltiin. Pakkautuvuustiheyskokeiden tulosten vahvistamiseksi suoritettiin koevaluja laboratorion viiden litran Hobart-sekoittimella. Betonimassan työstettävyysominaisuuksien lisäksi testattiin koekappaleiden puristuslujuus.

Edellä kuvattujen kokeiden tuloksena havaittiin, että runkoaineseokseen tarvittavan vesimäärän pienentyminen aiheuttaa suoraan puristuslujuuden kasvamisen. Koko betonimassan muodostaminen siten, että vesimäärää voidaan vähentää, vaikuttaa puolestaan edullisesti massan työstettävyyteen (Cwirzen et al., 2005). Näiden yhteyksien havaitseminen osoitti pakkautuvuuskokeiden olevan erittäin hyvä tapa löytää muutoksille herkille erikoislujille betoneille juuri sellaisia koostumuksia, joilla sekä työstettävyys että lujuus saadaan tyydyttäväksi. Tämä on aikaisemmin ollut melko vaikeaa ja erikoislujat betonit työstettävyydeltään kaukana perinteisestä betonista.

Betonien koostumukset valittiin tätä työtä varten juuri näiden rakennusmateriaalitekniikan laboratorion projektissa saatujen tulosten perusteella. Tämän tutkimuksen alkaessa kyseiset betonit olivat työstettävyys- ja lujuusominaisuuksiltaan parhaita, joita yllä kuvattujen menetelmien avulla oli ehditty kehittää. Tämän työn edetessä myös erilaisten betonikoostumusten testaaminen ja kehittäminen projektissa jatkui ja yhä parempiin lopputuloksiin päästiin, mutta nämä keskenään hiukan erilaiset betonit edustavat kuitenkin mielenkiintoista otosta projektin hyvistä erikoislujista betoneista.

Tämän tutkimuksen erikoislujissa betoneissa käytetyt materiaalit:

□ Sideaineet

- Sulfaatinkestävä rakennussementti (SR-sementti), CEM I 42,5 N, Finnsementti Oy
- Mikrosilika 983 U, amorfinen hieno silika, Elkem refractories, Norja

□ Runkoaineet

- Hieno hiekka, raekoko 160-600 µm
- Kvartsi, FFQ 200 M, SP Minerals, Kemiö

□ Lisäaineet

- Tehonotkistin Kolloment GE, maahantuoja Conjust Oy, Vantaa (kutistuma- ja virumakoeappaleet sekä pistekuormakoeappaleet)
- Tehonotkistin Maxiflow 40 (FM), Grace, Saksa (hybridibetonikappaleet)
- Super absorbent polymer (SAP), autogeenistä kutistumista rajoittava polymeeri, Tanska

□ Vesi

- Espoon vesijohtovesi, noin +25 °C

Sementtinä käytettiin Finnsementti Oy:n SR-sementtiä, joka on normaalisti kovettuva sulfaatinkestävä portlandsementti. Se soveltuu hyvin korkealujuusbetonin valmistamiseen, koska sillä on pieni vedentarve ja korkea loppulujuus. SR-sementin hienous on 340-400 m²/kg ja seitsemän vuorokauden hydrataatiolämpö 230-300 kJ/kg.

Silikan SiO₂-pitoisuus on yli 97 %, hiilipitoisuus alle 0,5 % ja siinä on 0,08 % yli 45 µm:n partikkeleita. Kvartsin SiO₂-pitoisuus on 99,4 %, pH 5,5 ja tilavuuspaino 1,1 t/m³.

Kolloment GE ja Maxiflow 40 (FM) edustavat uuden sukupolven tehonotkistimia korkealujuus- ja itsestivistävälle betonille. Kollomentin kuivatilavuus on 30 % painosta, se sisältää alle 2 % Na₂O:ta ja painaa 1,06+-0,02 g/ml. Maxiflow:n tiheys on 1,07 g/cm³, pH noin 6,5, kloridipitoisuus alle 0,1 % ja alkalipitoisuus noin 1 %.

SAP:n tarkoitus on vähentää autogeenista kutistumaa. Sitä käytetään betoneissa sisäisenä jälkihoitona. Polymeerit ovat pieniä valkoisia palloja, jotka betonimassaan lisättyinä imevät kosteutta itseensä kovettumisen alkuvaiheessa ja luovuttavat sitä myöhemmin hydrataatioon.

Normaali- ja masuunikuonabetonissa käytettiin runkoaineina kahdeksaa eri lajitetta sekä filleriä. Sementtinä oli Finnsementti Oy:n Rapid-sementti (CEM II/A-LL 42,5 R).

5.2 KUTISTUMA- JA VIRUMAKOKEISSA KÄYTETYT BETONIT

Kaikissa tutkimusosioissa käytettyjen betonien koostumukset olivat samat, mutta hybridi- ja pistekuormakokeiden betonit esitellään erikseen seuraavassa luvussa, koska niiden koostumukseen jouduttiin tekemään pieniä muutoksia ennen kyseisten kokeiden aloitusta. Lisäksi niissä tarvittiin myös matalampilujuuksisia tavanomaisia betoneita, joiden koostumukset ja ominaisuudet esitetään myös lyhyesti.

Betoni F26/022 koostui sementistä, silikasta, hiekasta, kvartsista, vedestä ja notkistimesta. Hiekan osuus betonissa oli 80 % sementin määrästä ja kvartsin 20 %. Notkistinta annosteltiin 3,2 % (kutistuma- ja virumakokeet) tai 4 % (hybridirakenne- ja pistekuormakokeet) sementin määrästä.

Betonissa F3/022 käytettiin runkoaineena ainoastaan hiekkaa, jota oli 110 % suhteessa sementin määrään. Myös notkistimen määrä oli suurempi betoniin F26/022 verrattuna; sitä lisättiin 5 % sementin määrästä.

Betoni F26/026/SAP vastasi ainesosiltaan pääosin betonia F26/022, mutta siihen lisättiin myös autogeenista kutistumaa vähentävää polymeeria. Betonissa F26/026/SAP oli vettä 23 % sementin määrästä ja notkistinta 4 %. Polymeeria annosteltiin 45 litran betonierään 0,13 kg eli 0,3 % sementin määrästä.

Betonien koostumukset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Erikoislujien betonimassojen koostumukset sementin määrään suhteutettuna sekä 45 dm³ erässä betonia.

	F26/022		F3/022		F26/026/SAP	
Ainesosa	%	kg/45 dm ³	%	kg/45 dm ³	%	kg/45 dm ³
Sementti	1	43,71	1	42,03	1	40,80
Silika	0,25	10,93	0,25	10,51	0,25	10,21
Hiekka	0,80	34,97	1,1	46,23	0,80	32,67
Kvartsi	0,20	8,74	-	-	0,20	8,17
Notkistin <i>Kolloment GE</i>	0,032	1,400	0,05	2,102	0,04	1,636
Vesi	0,20	8,701	0,19	7,839	0,23	9,499
SAP	-	-	-	-	0,003	0,130

5.3 HYBRIDIRAKENNE- JA PISTEKUORMAKOKEISSA KÄYTETYT BETONIT

Hybridirakenne- ja pistekuormakokeissa käytettiin samoja erikoislujia betoneita kuin kutistuma- ja virumakokeissa, mutta notkistimen käyttöön jouduttiin tekemään joitain muutoksia. Lisäksi molemmissa kokeissa käytettiin erikoislujien betonien F26/022N,

F26/022/H, F3/022/N, F3/022/H, F26/026/SAP/N ja F26/026/SAP/H lisäksi matalampilujuuksisia normaalibetonia ja masuunikuonabetonia.

Suhteitusta jouduttiin tarkistamaan, koska sementtierä vaihtui ensin ennen hybridirakennekokeita ja jälleen ennen pistekuormakokeita. Uudet erät sementtiä tekivät betonimassoista yllättäen huomattavasti jäykempiä kuin ensimmäinen käytössä ollut erä kyseistä SR-sementtiä. Erityisesti muutos vaikutti betonin F26/022 työstettävyyteen. Tämä oli hyvä osoitus siitä, miten herkällä alueella erikoislujien betonien kanssa vielä liikutaan: vaikka on löydetty hyvän työstettävyyden ja lujuuden takaavia koostumuksia, ne voivatkin olla herkkiä pienillekin muutoksille betonissa käytettyjen yksittäisten materiaalien ominaisuuksissa tai määrissä. Näin ollen ei voida nimetä esimerkiksi yhtä ainoata tämän tutkimuksen erikoislujissa betoneissa parhaiten toimivaa notkistinta, vaan muutamasta hyväksi havaitusta notkistimesta on aina valittava kulloisiinkin kuiva-aineseriin sopivin.

Kun erikoislujien betonimassojen työstettävyyden huomattiin muuttuvan uuden sementtierän myötä, Kolloment GE -notkistin vaihdettiin toiseen paremman työstettävyyden antavaan notkistimeen Maxiflow 40 (FM). Betonin F26/022 suhteitukseen tehtiin samasta syystä myös toinen muutos: notkistimen määrää lisättiin 0,04 %:iin sementtimäärän mukaan laskettuna, kun se aiemmin oli 0,032 % sementtimäärästä. Taulukossa 4. näkyy betonin F26/022 uusi koostumus notkistimen vaihdon jälkeen. Betonien F3/022 ja F26/026/SAP koostumuksia ei ole tarpeen esittää tässä uudestaan, sillä ainesosien määrät pysyivät samoina, vaikka notkistin vaihtui.

Taulukko 4. Hybridirakennekokeissa käytetty betoni F26/022, kun notkistin vaihdettiin ja sen määrää hieman lisättiin. Ainesosien määrät on esitetty osuuksina sementin määrästä sekä kilogrammoina 45 dm³ betonierässä.

	F26/022	
Ainesosa	%	kg/45 dm³
Sementti	1	43,57 kg
Silika	0,25	10,89 kg
Hiekka	0,80	34,86 kg
Kvartsi	0,20	8,71 kg
Notkistin <i>Maxiflow 40 (FM)</i>	0,04	1,743 kg
Vesi	0,20	8,445 kg
SAP	-	-

Ennen pistekuormakokeiden aloitusta käyttöön tuli taas uusi erä sementtiä, joka jälleen vaikutti betonien työstettävyyteen negatiivisesti. Tällä kertaa notkistimen annostelua ei kuitenkaan muutettu, vaan materiaalien määrät pidettiin kaikilla betoneilla samana kuin hybridirakenteissa. Sen sijaan notkistin päätettiin taas vaihtaa kutistuma- ja virumakoebetoneissa käytettyyn Kolloment GE:hen, joka antoi tämän sementtierän kanssa paremman työstettävyyden kuin Maxiflow 40 (FM) -notkistin.

Pistekuormakokeisiin valmistetuista betoneista tuli notkistimen vaihdosta huolimatta huomattavasti jäykempiä kuin aiemmin. Tämän vuoksi pistekuormakokeita varten valmistettujen betonien tuoreen betonin kokeiden tulokset esitetään erillään muista tuoreen betonin kokeiden tuloksista.

Hybridirakenne- ja pistekuormakokeissa käytetyt matalampilujuuksiset betonit olivat rapid-sementistä valmistettu normaalibetoni sekä saman suhteituksen pohjalta tehty masuunikuonabetoni, joiden lujuusluokka oli K35. Normaalibetonin ja masuunikuonabetonin suhteitukset tehtiin käytettävissä olevien runkoaineiden perusteella. Kuonan aktiivisuuskerroin oli 0,8 ja masuunikuonan osuus sideaineesta 70 %. Lisäaineita ei käytetty. Suhteitukset on esitetty taulukossa 5. Käytetty annoskoko oli 60 dm³, jonka suuruiseen erään tarvittavat määrät on myös esitetty taulukossa.

Taulukko 5. Normaalibetonin ja masuunikuonabetonin koostumukset 1000 dm³:ssa ja 60 dm³:ssa.

	Normaalibetoni		Masuunikuonabetoni	
	kg/m ³	kg/60 dm ³	kg/m ³	kg/60 dm ³
<i>Runkoaine</i>	1855,00		1881,00	
Filleri	74,20	4,45	22,53	1,35
0,1-0,6	222,60	13,36	225,72	13,54
0,5-1,2	222,60	13,36	225,72	13,54
1-2	222,60	13,36	225,72	13,54
2-5	333,90	20,03	338,58	20,31
5-10	371,00	22,26	376,20	22,57
8-16	408,10	24,49	413,82	24,83
<i>Sideaine</i>			296,00	
Sementti	296,00	17,76	241,00	6,18
Masuunikuona			103,00	14,46
Vesi	190,00	11,40	180,00	10,80
(Ilma)	20,00		20,00	

5.4 TUTKIMUKSESSA KÄYTETTYJEN BETONIEN VALMISTUS

Erikoislujaa betonia valmistettiin joka valukerralla tarvittavasta määrästä riippumatta 45 litran erä, jotta kaikki koetuloksiin mahdollisesti vaikuttavat tekijät pysyivät mahdollisimman muuttumattomina koko tutkimuksen ajan. Käytössä olleen sekoittimen ominaisuuksien takia sekoitettavan määrän muutteluun olisi saattanut vaikuttaa betonimassan ja kovettuneen betonin ominaisuuksiin.

Sekoittimena käytettiin Rakennusmateriaalitekniikan laboratorion Zyklos-pakkosekoitinta. Betonin valmistus aloitettiin kuiva-ainesten, veden ja notkistimen punnitsemisella. Kuivat aineet punnittiin kymmenen gramman tarkkuudella, vesi ja notkistin yhden gramman tarkkuudella. Punnitut kuiva-aineet kaadettiin kerroksittain sekoittimeen siten, että hiekka tuli pohjimmaiseksi, sitten kvartsi (betoneissa F26/022 ja F26/026/SAP), silika ja päällimmäiseksi sementti. Kuiva-aineita sekoitettiin keskenään kahden minuutin ajan. Kuivasekoitus on erikoislujilla betoneilla tärkeää, jotta materiaalit sekoittuisivat kunnolla ja helposti paakkuuntuva silika hajoaisi tasaisesti koko betonimassaan. Silikan sekoittumiseen on kiinnitettävä erityistä huomiota, koska

mukana ei ole lainkaan karkeaa runkoainetta eli isompia kiviä, jotka normaalisti toimivat betonissa hienoaainespaakkujen jauhajina.

Sekoittimen yhä käydessä esisekoitettujen kuiva-ainesten joukkoon kaadettiin vesi ja siihen sekoitettu notkistin. Nestein annostelua ei siis lainkaan säännöstellty, vaan notkistin lisättiin kerralla koko vesimäärän mukana. Erikoislujassa betonimassassa on huomattavissa selvä muutos, kun notkistin alkaa vaikuttaa. Seos silminnähden kostuu eli muuttuu jauhomaisesta paakkuisemmaksi ja alkaa pakkautua sekoittimen seinämille. Väri tummuu ja sekoitus käy raskaammaksi. Tämän jälkeen on nähtävissä melko selvä hetki, jolloin betonimassa ikään kuin valahtaa kasaan ja muuttuu tasaiseksi, valettavaksi betoniksi. Betonia tarkkailtiin tähän kyseiseen hetkeen asti, jonka jälkeen sekoitusta jatkettiin vielä seitsemän minuuttia. Koska muutos tapahtui jokaisella massalla 30-50 sekunnin kuluessa nesteen lisäyksestä, kokonaisekoitusajaksi tuli massoilla F26/022 ja F3/022 aina noin kymmenen minuuttia. Kokonaisekoitusajalla tarkoitetaan siis aikaa kuiva-ainesten sekoittamisen alkamisesta koko betonimassan valmistumiseen saakka.

Betonilla F26/026/SAP kokonaisekoitus aika oli noin 11 minuuttia, sillä kuivasekoitus aika oli polymeerin lisäyksen takia minuutin pidempi kuin betoneilla F26/022 ja F3/022. Polymeeri kaadettiin sekoitimeen vasta kahden minuutin kuivasekoituksen jälkeen, ja jotta polymeerikin sekoittui kuiva-ainesten joukkoon kunnolla, sekoitusta jatkettiin vielä yksi minuutti ennen nesteen lisäystä.

Pakkautuvuustiheyskokeissa havaittiin yhteys betonimassan nopeamman muutoshetken ja seoksen pienemmän vedentarpeen välillä (Cwirzen et al., 2005). Betoneilla, joilla pakkautuvuustiheys oli suuri eli vedentarve pieni, aika nesteen lisäyksestä betonimassan muuttumiseen tasaisen kosteaksi oli huomattavasti lyhyempi kuin enemmän vettä vaatineilla betoneilla.

Hybridirakenne- ja pistekuormakokeissa tarvittujen normaali- ja masuunikuonabetonien valmistustapa oli erilainen kuin erikoislujien betonien. Valmistus aloitettiin punnitsemalla tarvittavat runkoaineet, sementti, masuunikuona ja vesi. Ne lisättiin sekoitusastiaan kerroksittain siten, että pohjimmaiseksi laitettiin kolme karkeinta runkoainesta karkeimmasta alkaen, sitten sementti ja tarvittaessa masuunikuona ja päällimmäiseksi kolme hienointa runkoainesta sekä filleri. Lopuksi astiaan kaadettiin koko tarvittava vesimäärä, jonka imeytymistä hieman edesautettiin lastalla

sekoittamalla. Sekoitin ja ajanottokello käynnistettiin ja massaa sekoitettiin kolmen minuutin ajan. Valmistettavan betonierän koko oli joka valukerralla 60 dm^3 .

Jokaisen betonierän valmistuksen jälkeen tehtiin tuoreen betonin kokeet sekä valettiin $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$:n puristuslujuuskuutiot.

6 TUOREEN BETONIN KOKEET

6.1 TUOREEN BETONIN KOKEIDEN SUORITTAMINEN

Tuoreesta betonista määritettiin välittömästi betonin sekoituksen jälkeen lämpötila, ilmamäärä, T50-aika, leviämä, ilmamäärä ja minikartiokokeen leviämä. Nämä kokeet tehtiin kaikille erikoislujille betoneille. Hybridirakennekokeissa tarvittavien normaalibetonin ja masuunikuonabetonin testauksessa käytettiin osittain eri kokeita kuin erikoislujilla betoneilla. Vaikka kyseiset normaalilujuuksiset betonit eivät olekaan varsinaisesti tämän työn aiheena, näistäkin koemenetelmistä ja -tuloksista kerrotaan, jotta koekappaleiden koko valmistusprosessi tulee käsiteltyä. Normaalilujuuksisille betoneille suoritettut kokeet olivat lämpötilan, ilmamäärän, painuman ja Vebe-ajan mittaukset.

6.1.1 Lämpötila

Tuoreen betonin lämpötila mitattiin heti betonin valmistuksen jälkeen digitaalisella Ebro-lämpömittarilla. Mittarin mittauskärki upotettiin koko syvyydeltään eli noin kymmenen senttimetrin syvyyteen betonimassaan ja odotettiin, kunnes mittarin lukema stabiloitui. Mittaustarkkuus oli $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

6.1.2 Ilmamäärä

Erikoislujan massan ilmapitoisuus määritettiin standardin SFS-EN 12350-7 mukaisesti Rakennusmateriaalitekniikan laboratorion pienemmällä paineilmamenetelmällä toimivalla ilmamäärämittarilla, jonka mitta-astian tilavuus on yksi litra.

Astia täytettiin betonimassalla samalla täryttäen, jonka jälkeen reunat puhdistettiin määrällä sienellä betoniroiskeista ja kansi suljettiin tiiviisti. Ylimääräinen ilma poistettiin syöttämällä kannen aukkojen kautta mittariin vettä, jota oli seisotettu useita tunteja

huoneenlämmössä veden ilmamäärän vähentämiseksi. Veden syöttöaukot suljettiin, kun ilmakuplia ei enää tullut veden mukana ulos, ja kammioon pumpattiin ilmaa. Kun paineentasausventtiili avattiin, mittari ilmoitti betonimassan prosentuaalisen ilmamäärän. Ilmamäärä ilmoitetaan tuloksissa 0,1 % tarkkuudella.

Normaali- ja masuunikuonabetonimassojen ilmamäärän mittaus toimi samalla periaatteella, mutta se tehtiin laboratorion suuremmalla, kahdeksan litran mittalaitteistolla. Astia täytettiin kahdessa osassa, joiden välissä ja lopuksi suoritettiin lyhyt tärytys.

6.1.3 T50-aika ja leviämä

T50-ajan sekä leviämän määrittämiseksi 300 mm korkea katkaistu kartiomuotti (ylähalkaisija 100 mm ja alahalkaisija 200 mm) asetettiin vedellä kostutetun levyn keskelle ja täytettiin betonimassalla ilman sullontaa. Kun kartio oli täytetty ja pinta tasattu, muotti nostettiin rauhallisesti ylöspäin ja samalla käynnistettiin ajanottokello. Kun betonimassa oli levinnyt pöytään piirretyn halkaisijaltaan 50 cm:n ympyrän merkkiviivaan asti, kello pysäytettiin. Näin saatiin T50-aika.

Kun betonimassa oli lakannut leviämästä, mitattiin sen maksimileviämä. Mitta otettiin kahdesta kohdasta, joissa leviämä silmämääräisesti oli suurin, ja joissa betoni oli pysynyt selkeästi pöydän rajojen sisäpuolella. Leviämätuloksena ilmoitetaan näiden kahden mitan keskiarvo.

Tässä yhteydessä on huomautettava, että betonimassaa jäi liisterimäisen koostumuksensa takia aina melko reilusti kartion seinämille, vaikka kartion annettiin valua pöydän yllä muutaman sekunnin ajan noston jälkeen.

6.1.4 Minikartiokoe

Minikartiokokeessa pieni teräskartio asetettiin keskelle leviämäpöytää, jonka teräslevyn halkaisija oli 25 cm, ja täytettiin betonilla. Kartion korkeus oli viisi senttimetriä, ylähalkaisija seitsemän senttimetriä ja alahalkaisija kymmenen senttimetriä. Betonilla täytetty kartio nostettiin rauhallisesti suoraan ylöspäin, jotta betoni pääsi leviämään levyille. Minikartiokoetta käytetään tavallisesti laastien leviämän määrittämiseen, jolloin levyä pudotetaan kymmenen kertaa alustaa vasten. Tässä kokeessa ”lyöntejä” ei

kuitenkaan tehty. Kuten tuloksista myöhemmin nähdään, betoni valui lähes poikkeuksetta levyn reunojen ylitse ilman lyöntejäkin. Tällaisessa tapauksessa tuloksiin on merkitty leviämäksi >30. Mikäli betonin leviämä jäi levyn reunojen sisäpuolelle, sen halkaisija mitattiin kahdesta kohdasta ja otettiin näistä keskiarvo.

6.1.5 Painuma ja Vebe-koe

Painumakoe ja Vebe-koe tehtiin ainoastaan normaali- ja masuunikuonabetoneille eli niillä ei ole sinänsä suurta merkitystä tämän tutkimuksen kannalta. Koemenetelmät on silti syytä kuvailla, jotta koko hybridikappaleiden valmistusprosessi käy ilmi.

Painumakoe suoritettiin standardin SFS-EN 12350-2 mukaisesti. Standardin periaate on betonin kokoonpainuman mittaaminen, kun betoni tiivistetään katkaistuun kartioon ja kartio poistetaan. Metallisen kartiomuotin korkeus oli 300 mm, yläosan halkaisija 100 mm ja alaosan halkaisija 200 mm. Kartiota pidettiin tiiviisti laitteistoon kuuluvassa isommassa astiassa, ja se täytettiin betonilla kolmessa osassa. Jokainen kerros tiivistettiin iskemällä sulloinsauvalla 25 kertaa. Muotti poistettiin varovasti nostamalla. Painuma mitattiin muotin korkeuden ja kokoonpainuneen betonin korkeimman kohdan erotuksena.

Heti painumakokeen jälkeen määritettiin betonin Vebe-aika standardin SFS-EN 12350-3 mukaan. Laitteiston läpinäkyvä muovilevy käännettiin betonikartion päälle siten, että levy lepäsi siinä koko painollaan. Tärypöytä ja ajanottolaite käynnistettiin samanaikaisesti, ja pysäytettiin välittömästi, kun levyn alapinta kosketi koko pintalallaan betonia. Näin saatiin Vebe-aika, jonka standardin mukaan tulisi olla 5 ja 30 sekunnin välissä. Mittaustarkkuus standardin mukaan on 1 s. Osoittautui kuitenkin, että käytössä olleet betonit alittivat viiden sekunnin rajan, mutta koe tehtiin silti. Mittaustarkkuus oli 0,1 s.

6.2 TUOREEN BETONIN KOKEIDEN TULOKSET

Tuoreen betonin tuloksia käsitellään yhtenä kokonaisuutena kutistuma- ja virumakokeita ja hybridirakennekokeita varten valmistettujen betonimassojen osalta. Notkistimen vaihto ja betonin F26/022 suhteituksen muutos ennen hybridibetonivaluja eivät aiheuttaneet oleellisia muutoksia tuoreen betonin kokeiden tuloksiin eli käytettyjen betonien työstettävyyteen. Sen sijaan pistekuormakokeissa käytetyt betonit poikkesivat työstettävyyssominaisuuksiltaan sen verran edellisistä, että tuoreen betonin tulokset

esitetään tässä erikseen. Lisäksi käsitellään hybridirakenne- ja pistekuormakokeissa käytettyjen normaali- ja masuunikuonabetonien ominaisuudet.

Erikoislujien betonien tuoreen massan ominaisuudet on koottu taulukkoon 6. Normaalin ja masuunikuonabetonien ominaisuudet ovat taulukossa 7. Annetut tulokset ovat keskiarvoja kaikkien saman betonin eri valujen tuloksista. Kokeiden tulokset ovat myös liitteenä 1.

Taulukko 6. Erikoislujien betonien ominaisuudet.

	Kokonais-sekoitusaika [min:s]	Massan lämpö-tila [°C]	Ilma-määrä [%]	T50-aika [s]	Leviämä [cm]	Mini-kartio [cm]
F26/022	10:30	30,4	4,5	6,3	79,4	>30
F3/022	10:13	28,7	4,1	6,1	78,7	>30
F26/026/SAP	11:20	29,3	3,8	4,5	88,4	>30
Pistekuormakokeet						
F26/022	10:20	30,3	5,4	13,3	64,0	21,5
F3/022	10:00	29,5	5,9	8,2	69,8	26,5
F26/026/SAP	10:45	30,1	5,8	7,6	74	>30

Taulukko 7. Normaali- ja masuunikuonabetonin ominaisuudet.

	Massan lämpötila [C°]	Ilmamäärä [%]	Painuma [cm]	Vebe [s]
C	26,2	2,7	2,8	2,6
M	24,3	2,7	3,9	1,9

6.3 TUOREEN BETONIN KOETULOSTEN TARKASTELU

Tuoreen betonin koetuloksista nähdään, että kaikki tutkitut erikoislujat betonit olivat erittäin hyvin työstettäviä, käytännössä itsetiivistyviä. Minikartiokokeessa ei tehty kokeeseen kuuluvia lyöntejä, ja silti betonimassa levisi poikkeuksetta koko halkaisijaltaan 30 cm:n levyille tai sen reunojen yli. T50-aikaan ja leviämään vaikutti selvästi se, tehtiinkö koe välittömästi betonin valmistuksen jälkeen vai vasta hetkeä myöhemmin. Tämä johtuu erikoislujan betonin nopeasta jähmettymisestä. Betonimassan päälle alkaa heti valmistuksen jälkeen muodostua kalvo eli

työstettävyyssominaisuudet heikkenevät huomattavasti nopeammin kuin tavanomaisella betonilla. Joka tapauksessa T50-ajan ja leviämisen keskiarvot sopivat vaivatta itsetiivistyvälle betonille tyypillisiin raja-arvoihin (Mannonen et al. 2004). Parhaat T50-ajan ja leviämisen arvot saavutettiin betonilla F26/026/SAP. Kyseisellä betonilla saavutettiin myös pienin ilmamäärä. Ilmamäärä oli yleisesti ottaen tutkittavilla betoneilla melko suuri.

Toisinaan sekoitusastian reunoille jäi kuivasekoituksesta huolimatta kuiva-ainesta, joka ei sekoittunut betoniin. Erityisesti mikrosilikalla oli taipumusta jäädä kokkareina astian reunoille, jonka vuoksi isompia silikapaakkuja pyrittiin jo ennen sekoitusta hieman rikkomaan. Jos betonimassassa olisi mukana isompia runkoainepartikkeleja, paakkujen rikkoontuminen hoituisi niiden ansiosta sekoituksen aikana, mutta koska runkoaineena oli vain hienoa hiekkaa, oli täydelliseen sekoittumiseen kiinnitettävä enemmän huomiota. Yhdessä betonin F26/022 valussa silikaa jäi jostakin syystä huomattavan paljon sekoittumatta, mikä näkyi suurempana T50-aikana. Tämä tulos on jätetty yllä olevasta keskiarvosta pois, sillä se ei vastannut betonin normaalia työstettävyyttä. Sekoittumiseen liittyneet ongelmat johtuivat pääsääntöisesti itse sekoittimesta.

SR-sementtierän vaihtuessa toistamiseen ennen pistekuormakokeita varten tehtyjä valuja lisääntyi betonimassojen jäykkyys selkeästi, vaikka notkistin vaihdettiin taas Kolloment GE:hen. Erityisesti vaikutus näkyi kasvaneessa T50-ajassa ja pienemmässä leviämässä. Varsinaiseen koekappaleiden valmistamiseen tämä ei kuitenkaan vielä mitenkään vaikuttanut, olivathan betonit edelleen itsetiivistyviä ja hyvin työstettäviä. Tästä voidaan kuitenkin huomata, kuinka erikoislujat betonit ovat hyvin herkkiä pienillekin muutoksille koostumuksessa ja eri ainesosien ominaisuuksissa.

7 PURISTUSLUJUUSKOKEET

7.1 PURISTUSLUJUUSKOKEIDEN SUORITTAMINEN

Puristuslujuuskuutiot valmistettiin betonin puristuslujuuden sekä tiheyden testaamista varten jokaisen valun yhteydessä. Koekuutiot oli syytä valmistaa joka valun yhteydessä ensisijaisesti siksi, että niistä saatujen lujuus- ja tiheysarvojen perusteella pystyttiin varmentamaan, että betonin ainesosat oli punnittu oikein ja valmistus sujunut

virheettömästi. Koestus olisi paljastanut tällaiset virheet herkästi, kun taas muista tutkimuksista ei olisi voinut vastaavaa päätellä.

Puristuslujuuskuutiot valettiin öljytyihin $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$:n valurautamuotteihin. Täytön ajan kuutioita tärytettiin tärypöydällä. Kaikki tutkimuksessa käytetyt erikoislujat betonimassat olivat kuitenkin niin löysiä, käytännössä itsetiivistyviä, että todellisuudessa tarvittava tärytysaika oli melko lyhyt, vain muutamia sekunteja. Valmistuksen jälkeen kuutiot peitettiin muovilla kovettumisen ajaksi. Vuorokauden kuluttua muovit poistettiin, muotit purettiin ja kuutiot siirrettiin lämpökäsittelyyn tai suoraan kosteushuoneeseen.

Kutistuma- ja virumakoe-kappaleiden yhteydessä valmistetuista kuutioista testattiin puristuslujuus yhden, seitsemän ja 28 vuorokauden iässä. Näitä kuutioita säilytettiin 95 % suhteellisessa kosteudessa koestukseen saakka eli ne olivat koestettaessa märkiä. Hybridibetoni- ja pistekuormakoe-kappaleiden yhteydessä valmistetuista kuutioista lujuus testattiin vain 28 vuorokauden iässä. Nämä kuutiot siirrettiin viikon iässä kosteussäilytyksestä 65 %:n suhteelliseen kosteuteen eli ne olivat koestettaessa kuivia.

Puristuslujuus testattiin Rakennusmateriaalitekniikan laboratorion Toni Technicin hydraulisella puristimella. Koestus suoritettiin standardin SFS-EN 12390-3 mukaan. Ennen koestusta kuutioiden koestuspinnat hiottiin hiomakivellä sileiksi ja koneeseen syötettiin oikeat asetukset sekä kappaleen mitat ja paino. Kappale keskitettiin alustalle mahdollisimman tarkasti ja laite käynnistettiin. Tuloksina saatiin kappaleen puristuslujuus sekä tiheys.

7.2 PURISTUSLUJUUSKOKEIDEN TULOKSET

Tässä luvussa esitellään kaikkien tutkimuksessa käytettyjen betonien puristuslujuuskokeiden tulokset. On muistettava, että kutistuma- ja virumakokeiden koekappaleiden kanssa valetut kuutiot säilytettiin märässä tilassa koestukseen saakka, ja hybridirakennekokeiden ja pistekuormakokeiden yhteydessä valmistetut kuutiot säilytettiin kuivassa. Tämän vuoksi tulokset esitetään erikseen, sillä tiedetään, että säilytys vaikuttaa lujuustulokseen: kuiva koekappale antaa puristuslujuuskokeessa suuremman lujuuden kuin märkä kappale (Betonitekniikan oppikirja, 2004). Kaikkien samasta massasta tehtyjen valujen tulokset esitetään yhtenä keskiarvona. Tulokset on muutettu vastaamaan 150 mm kuution tuloksia kertoimella 0,97 (Betonitekniikan

oppikirja, 2004). Kaikki puristuslujuuskokeiden tulokset, kappaleiden tiheydet sekä hajonnat ovat liitteessä 2. Alla olevasta taulukosta 8 on jätetty hybridirakennekokeiden tuloksista pois yksi betonin F3/022 28 vuorokauden puristuslujuustuloksista, sillä se alitti muut tulokset selkeästi (128 MPa).

Taulukko 8. Erikoislujien betonien puristuslujuuskokeiden tulokset sekä lämpökäsitellyille että - käsittelemättömille kuutioille [MPa]. Tulokset on muutettu 150 mm kuution tuloksiksi kertoimella 0,97.

	Kutistuma- ja virumakoe			Hybridirakennekoe	Pistekuormakoe
	1 d	7 d	28 d	28 d:n keskiarvo	28 d
F26/022/N	67,5	120,6	137,1	145,7	142,1
F26/022/H	-	192,3	190,4	182,0	171,3
F3/022/N	47,8	108,8	136,9	141,1	128,6
F3/022/H	-	174,7	178,7	166,0	163,7
F26/026/SAP/N	40,1	105,9	141,5	152,0	146,0
F26/026/SAP/H	-	159,6	170,0	176,3	155,9

Taulukko 9. Hybridirakennekokeissa ja pistekuormakokeissa käytettyjen normaali- ja masuunikuonabetonien puristuslujuuskokeiden tulokset [MPa]. Tulokset on muutettu 150 mm kuution tuloksiksi kertoimella 0,97.

	Hybridirakennekoe, 28 d:n keskiarvo	Pistekuormakoe, 28 d
C	40,0	39,2
M	36,3	34,8

7.3 PURISTUSLUJUUSKOKEIDEN TULOSTEN TARKASTELU

Puristuslujuutta tarkasteltiin yhden, seitsemän ja 28 vuorokauden iässä. Eniten tuloksia on 28 vuorokauden ikäisiltä kuutioilta, sillä yhden ja seitsemän vuorokauden tulokset otettiin vain kutistuma- ja virumakoe-kappaleiden kanssa valetuilta kuutioilta.

Puristuslujuuskokeissa oli havaittavissa selkeitä eroja eri massojen välillä sekä ennen kaikkea lämpökäsitteltyjen ja -käsittelemättömien kappaleiden välillä. Lämpökäsittely paransi betonien lujuutta oleellisesti. Erityisesti lämpökäsittelyn vaikutus on nähtävissä kvartsia sisältävällä betonilla F26/022. Seitsemän vuorokauden puristuslujuustuloksista huomataan, että lämpökäsittellyt kappaleet myös saavuttavat suuren lujuutensa aiemmin kuin lämpökäsittelemättömät. Lämpökäsittelyillä kappaleilla lujuus on jo seitsemän vuorokauden iässä miltei sama kuin 28 vuorokauden iässä, kun taas lämpökäsittelemättömillä kappaleilla lujuus kehittyy vielä oleellisesti.

Koekuutioiden erilaisten säilytysominaisuuksien vaikutuksesta lujuuteen voidaan tehdä vain suuntaa-antavia johtopäätöksiä, sillä vain muutama kappaleista säilytettiin koko ajan 95 % kosteudessa eli valtaosa kuutiosta oli koestettaessa kuivia. Aineisto on siis melko vähäinen mitään vakavampaa vertailua ajatellen. Märkien koekappaleiden koestuksesta on saatu huonompia tuloksia lukuun ottamatta betoneita F26/022/H ja F3/022/H, joilla kuivat koekappaleet ovat antaneet paremman tuloksen. Oletuksenahan oli, että kuiva koekappale saavuttaa suuremman puristuslujuuden kuin märkä.

Selkeästi paras puristuslujuus saavutettiin Kemiö-kvartsia sisältävän betonin F26/022 lämpökäsittelyillä kuutioilla. Lämpökäsittelemättömillä kappaleilla paras tulos saatiin betonista F26/026/SAP valmistetuilla kuutioilla, tosin ero muihin betoneihin verrattuna oli melko pieni. Hajonta oli muutamaa sarjaa lukuun ottamatta pientä kaikilla betoneilla. Normaali- ja masuunikuonabetonien lujuus oli lähes tavoiteltu 35 MPa.

8 KUTISTUMA- JA VIRUMAKOKEET

8.1 KUTISTUMA- JA VIRUMAKOEKAPPALEET JA KOEJÄRJESTELYT

Betonien valmistuspäivät olivat 7.6.2005 (F26/022/N ja F26/022/H), 9.6.2005 (F3/022/N ja F3/022/H) ja 13.6.2005 (F26/026/SAP/N ja F26/026/SAP/H). Koekappaleiden pienestä koosta johtuen yksi erä kutakin betonia riitti hyvin sekä lämpökäsitteltyjen että lämpökäsittelemättömien kappaleiden valmistukseen. Jokaisesta betonimassasta valmistettiin 15 kappaletta 100 x 100 x 100 kuutioita sekä 12 kappaletta kutistumakoe- ja 12 kpl virumakoelieriöitä, joiden korkeus oli 200 mm ja halkaisija 50 mm. Puolet näistä lieriöistä lämpökäsiteltiin. Lisäksi joka betonista valmistettiin kuusi lieriötä, joiden korkeus oli 120 mm. Näistäkin puolet lämpökäsiteltiin. Lyhyemmät

lieriöt tehtiin puristuslujuuden määrittämiseksi seitsemän vuorokauden iässä, sillä virumakoeuorma määräytyi tämän puristuslujuuden avulla. Puristuslujuuslieriöt olivat hieman lyhyempiä kuin varsinaiset kutistuma- ja virumakoe-lieriöt, sillä oli mahdollista että yhtä pitkät ja hoikat lieriöt eivät soveltuisi puristuslujuuskokeeseen kovin hyvin. Kustakin betonista valmistetut koekappaleet on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Kustakin betonista valmistetut koekappaleet kutistuma- ja virumakokeissa.

Koekappale	Käyttökohde	Määrä [kpl]	Lämpökäsittelyyn [kpl]
Kuutio 100 x 100 x 100	Puristuslujuuskoe 1 d + 7 d + 28 d	3 + 6 + 6	0 + 3 + 3
Lieriö 50 x 200	Kutistumakoe + virumakoe	12 + 12	6 + 6
Lieriö 50 x 120	Puristuslujuus 7 vrk virumakoetta varten	6	3

Lieriöt valettiin muoviputkiin, joiden toiseen päähän oli liimattu kansi. Täytön jälkeen putkia tärytettiin muutaman sekunnin ajan, vaikkakin tärytyksen hyöty oli hieman kyseenalainen, koska lieriöt olivat niin kapeita. Jäykemmällä betonilla niin kapean muotin täyttö olisi varmasti ollut hankalaa, mutta kyseisten betonien työstettävyyden ansiosta täyttö onnistui hyvin.

Valun jälkeen kaikki koekappaleet peitettiin muovilla kosteuden haihtumisen estämiseksi. Koekappaleita säilytettiin muovilla peitettynä laboratorion noin +21 °C lämpötilassa yhden vuorokauden ajan, jonka jälkeen muotit purettiin. Puolet kaikista koekappaleista siirrettiin suoraan kosteussäilytykseen, jossa suhteellinen kosteus on 95 % ja lämpötila +20 °C. Puolet koekappaleista laitettiin muottien purkamisen jälkeen lämpökäsittelyyn eli 90 °C vesihöyryyn kahdeksi vuorokaudeksi. Lämpökäsittelyn jälkeen kappaleet jäätyivät styrox-laatikoissa vuorokauden ajan äkillisen lämpötilan muutoksen aiheuttamien vaurioiden estämiseksi, jonka jälkeen nekin siirrettiin kosteussäilytykseen. Ensimmäisen viikon aikana kaikkien lieriöiden molemmat päät hiottiin tasaisiksi. Kappaleet pysyivät hionnassa märkinä eivätkä siis päässeet kuivumaan kosteussäilytyksen aikana hionnasta huolimatta.

Kutistumakoe aloitettiin kuitenkin välittömästi muottien purkamisen jälkeen ennen kappaleiden siirtämistä säilytykseen. Kuhunkin kutistumalieriöön liimattiin kuusi

Demec-nastaa kutistuman mittaamista varten. Jokaiseen kappaleeseen tuli näin ollen kolme mittaussinjaa, joista kutistumista voitiin myöhemmin mitata. Nastojen liimaus tehtiin Plastic Padding –nimisellä kemiallisella metallilla kappaleisiin merkittyihin ja hiottuihin kohtiin. Kaikki kappaleet ja niissä olevat mittaussinjat numeroitiin. Liiman kuivumisen jälkeen kappaleet punnittiin ja nastoista mitattiin ensimmäiset kutistumavot. Tämän jälkeen puolet kutistumalieriöistä siirrettiin lämpökäsittelyyn ja puolet kosteussäilytyshuoneeseen. Kutistumamittaukset tehtiin tämän jälkeen päivittäin, tosin lämpökäsittelyjen lieriöiden mittauksia jatkettiin vasta lämpökäsittelyn jälkeen.

Puristuslujuuskuutioista määritettiin yhden vuorokauden lujuus, ja loput kuutiot laitettiin vastaaviin säilytysolosuhteisiin kuin kutistuma- ja virumalieriöt myöhempiä seitsemän ja 28 vuorokauden puristuslujuuskokeita varten. Kuutioita ei kuitenkaan siirretty ennen koestusta pois 95 %:n kosteudesta kuten lieriöille tehtiin.

Seitsemän vuorokauden iässä puolet kutistuma- ja virumalieriöistä siirrettiin 65 % suhteelliseen kosteuspitoisuuteen ja puolet 85 % suhteelliseen kosteuspitoisuuteen. Lämpötila molemmissa olosuhteissa oli +20 °C. Lyhyempien 120 mm korkeiden lieriöiden puristuslujuus testattiin. Kun virumakoe-kappaleiden pinta oli kuivahtanut, niihin liimattiin kolme paria Demec-nastoja samalla tavoin kuin kutistumakappaleisiin ja nastoista mitattiin ensimmäiset arvot, joihin myöhempiä tuloksia verrattiin.

Taulukko 11. Kustakin betonista valmistettujen koekappaleiden käsittely.

Kappale	1 vrk	7 vrk	28 vrk	n. 365 vrk
Kuutio 100 x 100 x 100	Puristuslujuus- koe, 3 kpl	Puristuslujuus- koe, 6 kpl	Puristuslujuus- koe, 6 kpl	
Lieriö 50 x 120		Puristuslujuus- koe, 6 kpl		
Lieriö 50 x 200	Kutistuma- mittausten aloitus, 12 kpl	Viruma- mittausten aloitus, 12 kpl		Mittausten päättäminen

Kutistumakoe-kappaleet kasattiin päällekkäin kolmen kappaleen pinoiksi. Pinot seisoivat koetiloissa sellaisenaan, ja mittauksia varten kappaleet nostettiin yksitellen pois ja taas takaisin samaan järjestykseen. Koeolosuhteiden oli tarkoitus vastata mahdollisimman

tarkasti virumakoetta, jonka vuoksi kutistumakappaleita pidettiin vastaavissa pinoissa kuin virumakappaleet ovat telineissään ja veden haihtuminen päistä estettiin. Haihtumisen estämiseksi pinon ylimmän ja alimman kappaleen uloimpaan päähän liimattiin muovikalvo.

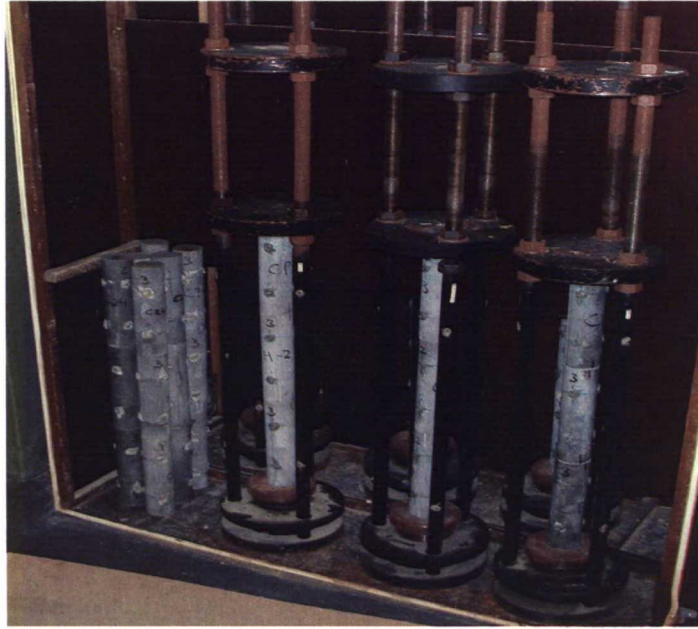
Virumakoekappaleet kasattiin niin ikään kolmen kappaleen torneihin erityisiin virumakoetelineisiin. Telineet olivat Rakennusmateriaalitekniikan laboratorion aikaisempaa korkealujuusbetonien virumakoetta varten suunniteltuja ja rakennettuja telineitä. Juuri telineiden takia tämän kokeen koekappaleet olikin tehtävä mahdollisimman hoikiksi, sillä kookkaammat kappaleet olisivat kestäneet niin suuren virumakuorman, että telineiden jouset olisivat luultavasti pettäneet.

Virumakoetelineessä on kolme pystytankoa ja niissä kolme levyä, joista alin eli se, jolla koekappaleet seisovat, on laakerin päällä ja kaksi muuta muttereilla ylempänä tangoissa kiinni. Kolmen koekappaleen torni keskitettiin telineeseen ja kuormitus asetettiin sen päälle nestetunkin ja kuorma-anturin avulla. Kuorman suuruudeksi asetettiin noin 30 % koestettujen lieriöiden puristuslujuudesta. Kuorman oli määrä pysyä samana koko virumakokeen ajan, ja ennen jokaista mittausta se tarkistettiin mittaamalla telineen tangoissa olleiden Demec-nastojen väliä. Kappaleiden viruessa kuorma luonnollisesti pieneni, ja tarvittaessa se korjattiin telineen muttereita kiristämällä. Lisäksi tarkistettiin, että kuorma jakautui mahdollisimman tasaisesti koekappalepinon koko pinta-alalle.

Lieriöiden puristuslujuuskokeiden tulokset ovat liitteessä 3. Virumakokeen kuormien suuruudet betoneille olivat:

▪ F26/022/N	76 kN
▪ F26/022/H	120 kN
▪ F3/022/N	70 kN
▪ F3/022/H	110 kN
▪ F26/026/SAP/N	68 kN
▪ F26/026/SAP/H	100 kN

Näillä koemenetelmillä kumpaankin kosteuteen (65 % RH ja 85 % RH) tuli kutakin betonia kohden kaksi kutistumakoekappaletornia sekä kaksi virumakoetelinettä. Toisessa pinossa tai telineessä oli lämpökäsiteltyjä ja toisessa lämpökäsittelemättömiä kappaleita. Yhteensä tutkittavana oli siis kuusi kutistumakappalepinoa ja kuusi telinettä kummassakin kosteusolosuhteessa. Koejärjestelyä havainnollistaa kuva 3.



Kuva 3. Kutistumakappalepinoja ja virumakoetelineitä 85 %:n suhteellisessa kosteuspitoisuudessa.

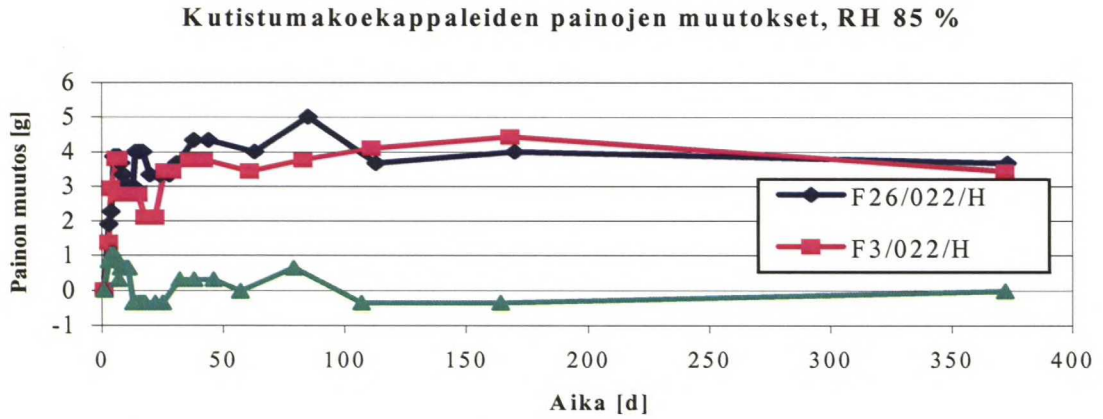
Kutistumista ja virumista seurattiin noin 365 vuorokauden ajan. Mittaukset suoritettiin alussa noin kahden viikon ajan päivittäin, kun kappaleissa tapahtuivat oleelliset muutokset. Sen jälkeen mittaukset tehtiin yhä harvenevasti, sillä muutoksia ei enää juurikaan tapahtunut. Kutistumakappaleiden ja virumatelineiden paino punnittiin säännöllisesti, jotta nähtäisiin paljonko koekappaleista haihtuu tai niihin absorboituu kosteutta.

Koekappaleiden säilytysolosuhteet eivät pysyneet tasaisina koko mittausjakson ajan, sillä huoneen lämpötilan- ja kosteudensäätölaitteiston kanssa oli ongelmia etenkin kesän ja syksyn 2005 aikana. Huoneen lämpötila oli välillä muutamia viikkojakin useita asteita tavoitetta korkeampi, ja näin ollen myös suhteellinen kosteus vaihteli välillä oleellisestikin.

8.2 KUTISTUMA- JA VIRUMAKOKEIDEN TULOKSET

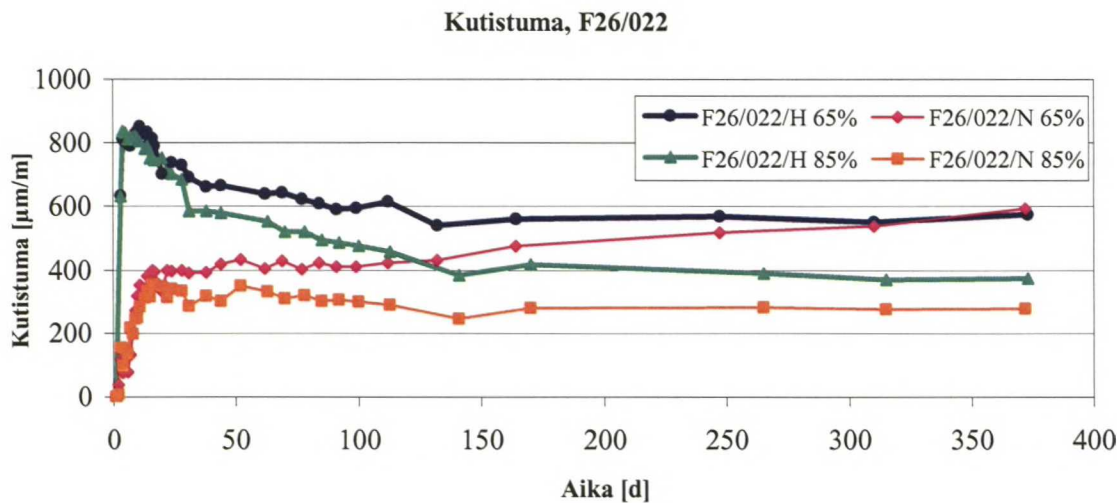
Kuvassa 4 on esimerkki eri betonien kutistumakappaleiden painojen muutoksista, kun kappaleet oli lämpökäsitelty ja niitä säilytettiin 85 %:n suhteellisessa kosteudessa. Kutistumakoekappaleiden painojen muutokset kaikissa olosuhteissa on esitetty liitteessä 10. Kutistumakoekappaleiden hionnan vaikutus kappaleiden painoihin on jätetty taulukoissa huomioimatta siten, että painon muutos on merkitty samaksi ennen ja

jälkeen hionnan. Liitteenä 11 ovat virumakoetelineiden painojen muutokset koko mittausjakson ajalta.

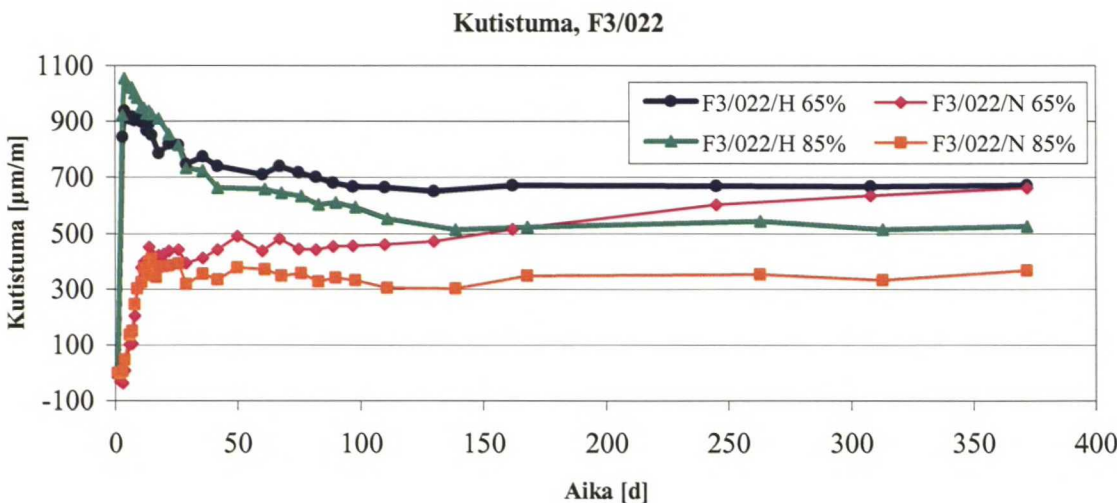


Kuva 4. 85 %:n suhteellisessa kosteuspitoisuudessa säilytettyjen lämpökäsiteltyjen kutistumakoekappaleiden painojen muutokset. Yhden betonin kuvaaja on keskiarvo kolmesta koekappaleesta.

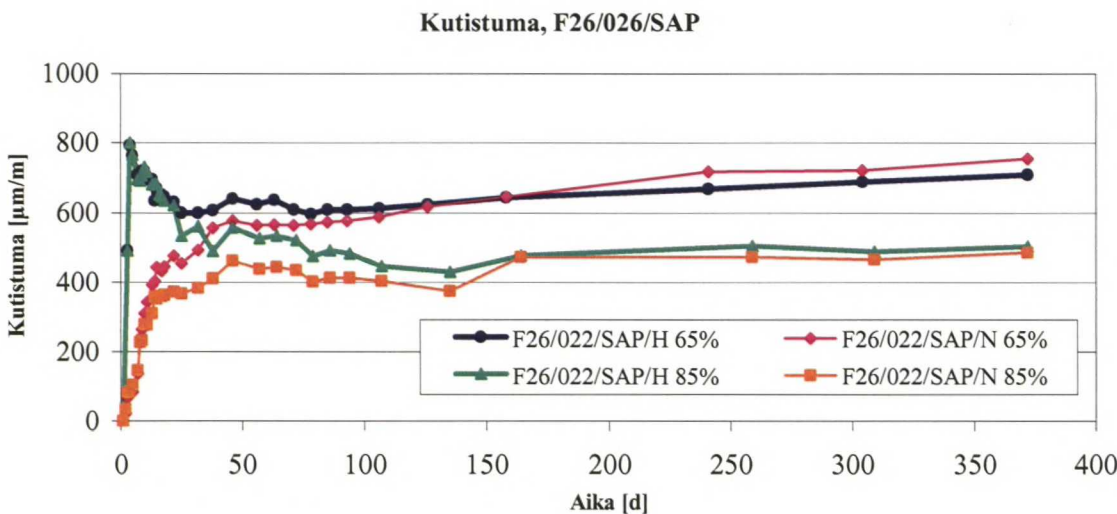
Kutistuma- ja virumakokeiden tulokset esitetään kuvissa 5-10 siten, että yhden betonin kaikki tulokset näkyvät samassa kuvassa. Yksi käyrä on siis aina keskiarvo kolmesta samanlaisesta koekappaleesta. Kaikki mittauks tulokset, joiden perusteella kuvaajat on piirretty, ovat liitteinä 4-9.



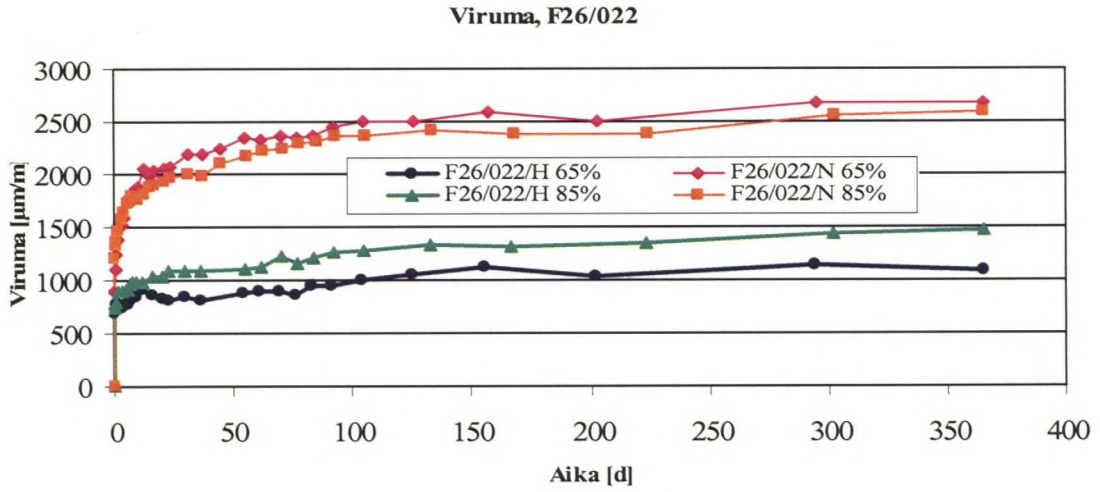
Kuva 5. Betonin F26/022 kutistuma.



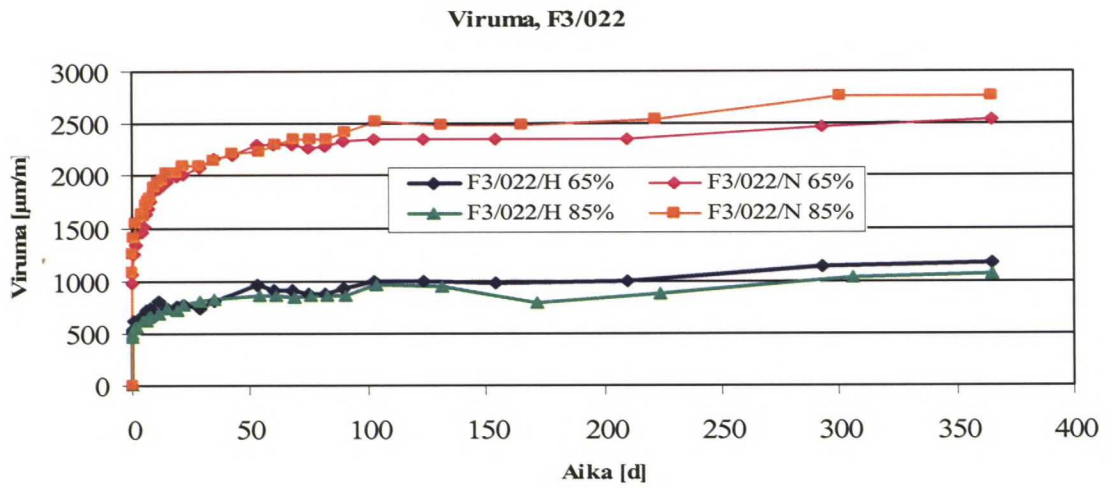
Kuva 6. Betonin F3/022 kutistuma.



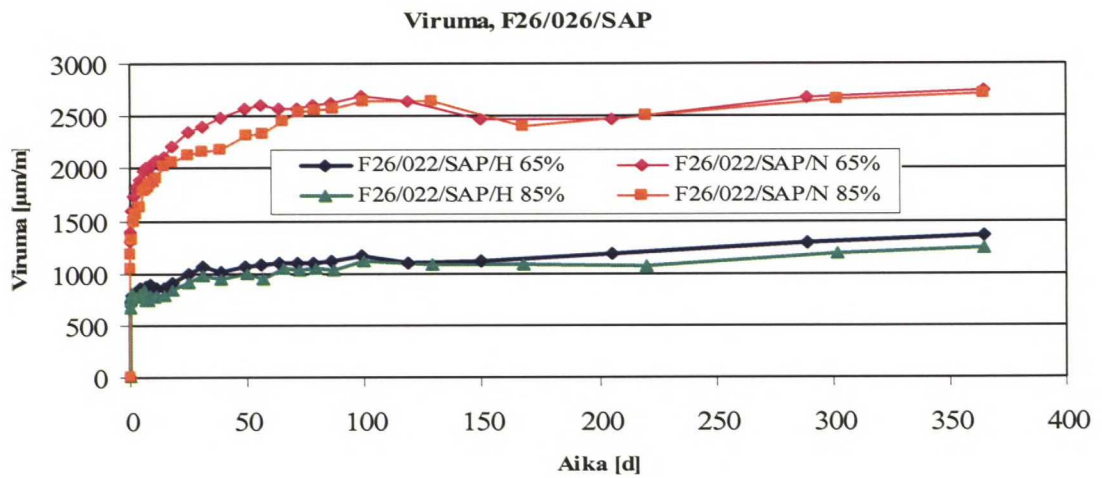
Kuva 7. Betonin F26/026/SAP kutistuma.



Kuva 8. Betonin F26/022 viruma.



Kuva 9. Betonin F3/022 viruma.



Kuva 10. Betonin F26/026/SAP viruma.

8.3 KUTISTUMA- JA VIRUMAKOETULOSTEN TARKASTELU

Vuoden aikana tapahtunut kutistuminen oli kaikilla kolmella betonilla samaa luokkaa eli isoja eroja ei ollut. Lämpökäsitellyillä kappaleilla kutistuminen tapahtui voimakkaasti jo lämpökäsittelyn eli kahden ensimmäisen vuorokauden aikana, jonka jälkeen tilanne pysyi tasaisena. Lämpökäsittelemättömillä kappaleilla kutistuma kehittyi loivemmin eikä myöskään ollut niin voimakasta kuin lämpökäsitellyillä. Kaikilla betoneilla 85 %:n kosteudessa säilytettyjen kappaleiden kutistuma jäi hiukan pienemmäksi kuin 65 %:n kosteudessa säilytettyjen, mikä viittaa kosteuden vähäisempään haihtumiseen betonista kosteammassa ympäristössä. Myös kaikkien 85 % kosteudessa säilytettyjen kappaleiden paino laski vähiten. Lämpökäsiteltyjen kappaleiden kutistuma oli noin 600-800 $\mu\text{m}/\text{m}$ ja lämpökäsittelemättömien noin 400 $\mu\text{m}/\text{m}$. Vertailun vuoksi huomattakoon, että tavanomaisella betonilla kutistuma on suuruusluokkaa 40-100 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Myöskään eri betonien virumassa ei ollut oleellisia eroja. Huomattavaa on, että lämpökäsitellyt kappaleet viruivat vähemmän kuin lämpökäsittelemättömät. Suurin viruminen tapahtui ensimmäisten päivien aikana, jonka jälkeen tilanne tasoittui. Lämpökäsittelemättömillä kappaleilla viruminen jatkui pidempään. Eri kosteusolosuhteissa säilytetyillä kappaleilla ei ollut merkittävää eroa, joskin kuvaajista voitaisiin päätellä, että samoin kuin kutistumamittauksissa 85 %:n kosteudessa olleet kappaleet viruivat hiukan vähemmän kuin 65 %:n kosteudessa olleet. Tämä lienee jälleen selitettävissä kappaleiden suuremmalla kosteuspitoisuudella kun ilmakin on kosteampaa. Ero on kuitenkin hyvin pieni, ja vaadittaisiin tarkempaa tilastollista tarkastelua selvittämään eron merkittävyyttä. Lämpökäsittelemättömien kappaleiden viruma oli noin 2500-3000 $\mu\text{m}/\text{m}$ ja lämpökäsiteltyjen noin 1500 $\mu\text{m}/\text{m}$. Normaalibetonin viruma on noin 700 $\mu\text{m}/\text{m}$. Lämpökäsittelemättömien erikoislujien betonien viruma oli siis noin 3,5 kertaa suurempi kuin normaalibetonin viruma, ja lämpökäsiteltyjen noin 40 % korkeampi yhden vuoden iässä.

Polymeeribetonin odotettiin kutistuvan ja viruvan vähemmän polymeerin toiminnan ansiosta. Nimensä mukaisesti polymeerin pitäisi vähentää autogeenistä kutistumaa imemällä betonin valmistusvaiheessa itseensä kosteutta ja luovuttamalla sitä myöhemmin hydrataation edetessä. Näissä kokeissa pienentävää vaikutusta kutistumaan ja virumaan ei kuitenkaan saavutettu.

Kutistumakoe-kappaleiden painot pääasiassa nousivat alle yhdestä grammasta muutamiin grammoihin. Paino nousi eniten heti muottien purkamisen jälkeen muutamia päiviä, mikä on selitettävissä kosteuden imeytymisellä betoniin, kun kappaleita säilytettiin 95 % kosteudessa. Myöhempää ajanjaksoa tarkasteltaessa huomataan, että eniten kosteutta imeytyi 85 % kosteudessa säilytettyihin kappaleisiin. Painonvaihtelu ja erityisesti alkuvaiheessa tapahtuva painonnousu oli vähäisintä betonilla F26/026/SAP/H.

Myös virumakappaleilla kosteuden haihtumisesta johtuva painon väheneminen oli suurinta lämpökäsittelimättömillä koe-kappaleilla, joita säilytettiin 65 %:n suhteellisessa kosteudessa. Sen sijaan kaikilla 85 %:n kosteudessa säilytetyillä lämpökäsittelyillä kappaleilla paino nousi joitakin grammoja.

Koe-kappaleiden säilytyskuoneen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelut laitteiston ajoittaisen epäkunnon vuoksi ovat voineet hieman vaikuttaa koetuloksiin.

9 HYBRIDIRAKENNEKOEKKEET

9.1 HYBRIDIRAKENNEKOEKAPPALEET

Hybridirakenteet olivat tässä tutkimuksessa palkkeja, joissa oli kerroksittain sekä erikoislujaa betonia että matalampilujuuksista betonia. Tarkoituksena oli selvittää, kuinka nämä lujuusominaisuuksiltaan täysin erilaiset betonit käyttäytyvät yhdessä samassa rakenteessa. Lähinnä mielenkiinnon kohteena oli siis eri betonikerrosten välisen sauman kestävyys. Palkkien kestävyyttä tutkittiin leikkaus- ja taivutuslujuuskokeilla. Hybridibetonipalkkeja oli kolme hieman erilaista, joiden lisäksi jokaisesta käytetystä betonilaadusta valettiin myös vastaavankokoiset vertailupalkit, joissa oli vain yhtä betonia kerrallaan.

Koe-kappaleet valmistettiin lokakuun 2005 ja helmikuun 2006 välisenä aikana. Valukertoja oli yhteensä 28. Kolmen erikoislujan betonin lisäksi hybridipalkeissa käytettiin tavanomaista Rapid-sementistä valmistettua betonia, ns. normaalibetonia, joka oli lujuusluokaltaan K35. Lämpökäsittelyssä palkeissa käytettiin normaalibetonin sijasta masuunikuonabetonia. Jokaisesta erikoislujasta betonista valmistettiin hybridipalkit sekä normaalibetonin että lämpökäsittelyä kestävä masuunikuonabetonin kanssa. Kaikki normaalibetonia sisältäneet palkit siirrettiin valun jälkeen suoraan

kosteussäilytykseen, ja kaikki masuunikuonabetonia sisältäneet palkit lämpökäsiteltiin ennen kosteussäilytystä. Vertailupalkit valmistettiin kaikista hybridipalkeissa käytetyistä betoneista.

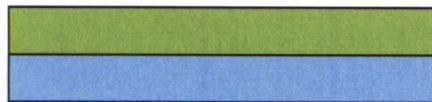
Tutkittavia palkkityyppejä oli viisi erilaista, kolme hybridipalkkia ja niitä vastaavat vertailupalkit, ja niistä käytetään tässä työssä seuraavia nimityksiä:

- palkki 1
- palkki 2
- palkki 3
- vertailupalkki A
- vertailupalkki B

Hybridipalkit 1, 2 ja 3 on esitetty kuvissa 11-13. Vertailupalkit vastasivat kooltaan näitä kahta erilaista palkkikokoa, mutta yksittäinen vertailupalkki valmistettiin aina vain yhdestä betonista. Jokaista erilaista palkkia ja vertailupalkkia valmistettiin kuuden kappaleen sarja.

Kuvien värit merkitsevät seuraavaa:

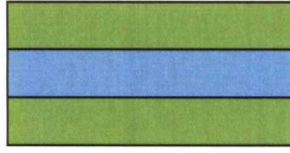
	normaalilujuuksinen betoni
	erikoisluja betoni



Kuva 11. Palkki 1. Mitat 100 x 100 x 500 mm³.

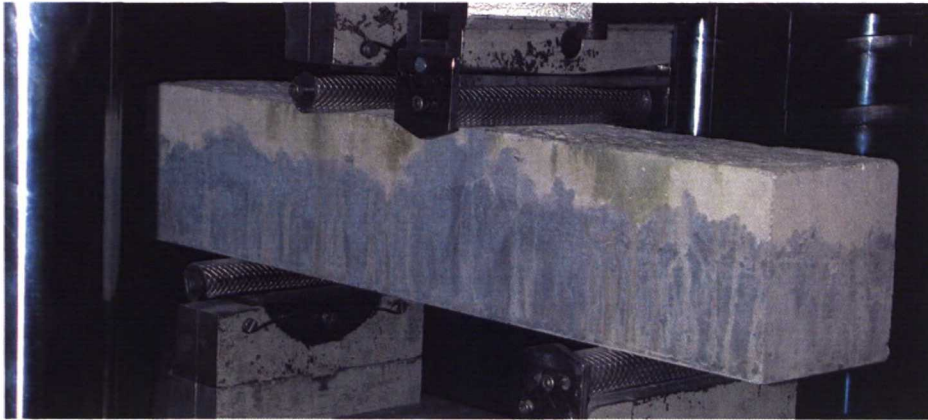


Kuva 12. Palkki 2. Mitat 100 x 100 x 500 mm³.

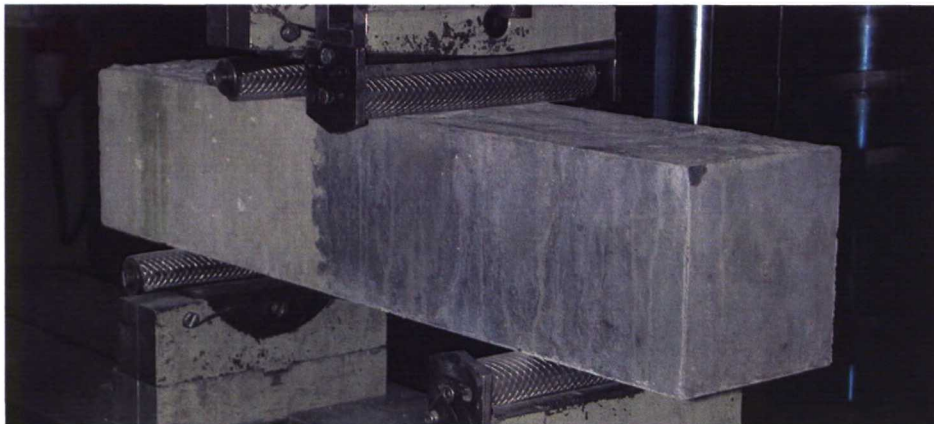


Kuva 13. Palkki 3. Mitat 150 x 150 x 300 mm³.

Palkki 1 ja palkki 2 olivat kooltaan 100 x 100 x 500 mm³. Palkissa 1 alempi kerros oli erikoislujaa betonia ja ylempi matalampilujuuksista betonia. Molemmat kerrokset olivat yhtä paksuja. Palkissa 2 kerrosten välinen sauma oli pystysuora, eli palkin toinen pää oli erikoislujaa betonia ja toinen matalampilujuuksista betonia. Kuten palkissa 1, sauma kulki symmetrisesti keskellä palkkia. Havainnollisuuden vuoksi palkit esitetään vielä kuvissa 14 ja 15, joissa ne ovat jo koestuslaitteistossa.



Kuva 14. Palkki 1.



Kuva 15. Palkki 2.

Palkin 3 koko oli $150 \times 150 \times 300 \text{ mm}^3$, ja se koostui kolmesta yhtä paksusta kerroksesta. Alin ja ylin kerros olivat matalampilujuuksista betonia ja keskimmäinen kerros erikoislujaa betonia.

Vertailupalkki A vastasi hybridipalkkeja 1 ja 2 eli sen koko oli $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}^3$. Vertailupalkki B vastasi palkkia 3, mitat olivat siis $150 \times 150 \times 300 \text{ mm}^3$.

Koekappaleet on esitetty listattuna taulukossa 12. Esimerkiksi merkintä M+F26/022/H tarkoittaa hybridipalkkia, jossa on käytetty masuunikuonabetonia ja erikoislujaa betonia F26/022/H.

Taulukko 12. Hybridirakennekokeiden koekappaleet ja niiden lukumäärät.

Hybridipalkit	Palkki 1 [kpl]	Palkki 2 [kpl]	Palkki 3 [kpl]	Vertailupalkit	A [kpl]	B [kpl]
C+F26/022/N	6	6	6	F26/022/N	6	6
C+F3/022/N	6	6	6	F26/022/H	6	6
C+F26/026/SAP/N	6	6	6	F3/022/N	6	6
M+F26/022/H	6	6	6	F3/022/H	6	6
M+F3/022/H	6	6	6	F26/026/SAP/N	6	6
M+F26/026/SAP/H	6	6	6	F26/026/SAP/H	6	6
				C	6	6
				M	6	6

9.2 KOEKAPPALEIDEN VALMISTUS JA SÄILYTYS ENNEN KOESTUSTA

9.2.1 Yleistä

Jokaista erilaista palkkityyppiä valmistettiin kuusi kappaletta. Kaikki kuusi samanlaista palkkia valettiin yhdellä valukerralla samasta betonierästä hajonnan minimoimiseksi. Tässä luvussa käsitellään jokaisen palkkityypin valmistaminen erikseen.

Palkit 1 ja 2 valettiin öljyttyihin valurautamuotteihin. Palkit 3 valettiin öljyttyihin puumuotteihin, jotka rakennettiin erikseen tätä tutkimusta varten. Valun jälkeen kaikki koekappaleet peitettiin muovilla veden haihtumisen estämiseksi.

Hybridipalkkeja valettaessa jouduttiin ensin valmistamaan molemmat palkkeihin tarvittavat betonit. Tällöin meneteltiin siten, että normaalilujuuksinen betoni valmistettiin ensin, koska sen työstettävyyssä on selkeästi pidempi kuin erikoislujalla betonilla. Heti perään sekoitettiin erikoislujaa betoni, jonka jälkeen aloitettiin koekappaleiden valmistus ja tehtiin kokeet molemmille tuoreille betoneille.

Yhdestä betonista valmistettavat vertailupalkit A ja B valettiin normaalin käytännön mukaisesti. Vertailupalkkeja ei valettu kerroksittain, kuten hybridipalkit, vaan muotti täytettiin yhdessä tai kahdessa osassa välillä hiukan täryttäen. Sen takia vertailupalkkeja ei voidakaan täysin verrata hybridipalkkeihin, mutta ne antavat kuitenkin tietoa käytössä olleiden eri betonien ominaisuuksista. Koestus tapahtui samalla lailla kuin vastaavien hybridipalkkien koestus.

Palkkeja tärytettiin täytön jälkeen muutaman sekunnin ajan. Sen pidempään tärytykseen ei ollut syytä, sillä erikoislujat betonit olivat käytännössä itsetiivistyviä ja normaalilujuuksisilla betoneilla olisi ollut pidemmässä tärytyksessä erottumisen vaara. Lisäksi näinkin isoilla palkkeilla hyvin notkea betoni saattoi alkaa tunkeutua palkin saumoista ulos, jos tärytys jatkui liian pitkään.

9.2.2 Palkkien valmistus

Palkin 1 valmistus aloitettiin valamalla alempi viiden senttimetrin paksuinen kerros erikoislujaa betonia. Kerroksen paksuus määritettiin tavallisella mittanauhalla, joten on selvää, ettei kappaleen ylä- ja alakerroksesta tullut millilleen yhtä paksuja. Tarkempaa menettelyä olisi kuitenkin ollut tässä tutkimuksessa turhan vaikeaa toteuttaa. Kun alempi kerros oli täytetty, tärytettiin hiukan. Kun jokaisesta palkista oli täytetty alempi kerros, palkit laitettiin sivuun odottamaan noin 30-50 minuuttia ennen ylemmän kerroksen täyttöö, jona aikana lujan betonin pinnalle ehti kehittyä kalvo. Tämän jälkeen ylempi normaalilujuuksisen betonin kerros täytettiin varovasti, jotta alemman kerroksen kalvo ei rikkoontuisi. Kun ylempi kerros oli täytetty, tärytettiin uudestaan.

Valutaukoon päädyttiin ensimmäisen valukerran jälkeen, kun havaittiin, että karkeaa runkoainetta sisältävä normaalibetoni painui täysin erikoislujan betonin sekaan, jos normaalibetonikerros valettiin välittömästi lujan betonin päälle. Toisin päin valettaessa (palkissa 3) tätä ongelmaa ei ollut. Kalvo kehittyi lujan betonin pinnalle melko nopeasti, ja noin 30 minuutin jälkeen se olikin kyllin vahva kannattelemaan pääosin ylemmää

betonia. Jonkin verran kalvo antoi odotusajan jälkeenkin periksi ja varsinkin muotin reunoilla kalvon alta työntyi lujaa betonia normaalibetonin sekaan odotusajasta huolimatta. Täysin tasaista rajapintaa oli siis mahdotonta saavuttaa ainakaan puolen tunnin valutauolla, mutta tauon pidentämisen mahdollista hyötyä tai haittavaikutuksia ei tässä tutkimuksessa tarkasteltu. Haittaa pidemmästä valutauosta olisi saattanut aiheutua esimerkiksi sauman tartunnalle eikä pitempi tauko olisi luultavasti kuitenkaan estänyt lujan betonin tunkeutumista muotin reunoilla ylöspäin. Tässä tutkimuksessa tähän menettelyyn siis tyydyttiin, koska kerrosten rajapinnasta saatiin kuitenkin kohtuullisen selkeä.

Palkin 3 täyttö toteutettiin samoin periaattein kuin palkin 1 täyttö, kuitenkin sillä erolla että tässä palkissa oli kolme kerrosta. Ensin täytettiin alin kerros matalampilujuuksista betonia. Kerroksen paksuus tarkistettiin tätä tarkoitusta varten tehdyllä mittalevyllä. Palkkia tärytettiin lyhyesti, ja heti perään täytettiin keskimmäinen eli erikoisluja kerros, jonka paksuus tarkistettiin jälleen mittalevyllä. Palkkia tärytettiin taas lyhyesti. Näiden kerrosten välissä ei tarvittu odotusaikaa, sillä erikoisluja betoni pysyi hyvin normaalin betonimassan päällä erillisenä kerroksena. Kun kaksi kerrosta oli täytetty, odotettiin taas 30-50 minuuttia ennen kuin lisättiin ylin kerros matalampilujuuksista betonia. Jälleen kalvon muodostumisesta huolimatta lujaa betonia tunkeutui jonkin verran muotin reunoilta ylöspäin, kuten palkissa 1. Ylimmän kerroksen täytön jälkeen tärytettiin taas lyhyesti.

Palkin 2 täyttäminen oli yksinkertaisempaa kuin palkin 1, sillä lujan betonin kovettumista ei tarvinnut odottaa koska betoneita ei valettu päällekkäin. Täytön helpottamiseksi ohuesta pellistä leikattiin muotin levyinen kädensijalla varustettu levy. Levyä pidettiin käsin paikoillaan muotin puolessavälissä, ja molemmat puolet täytettiin samaan aikaan eri betoneilla, kuten kuvassa 16 näkyy. Kun muotti oli täynnä, levy vedettiin varovasti pois, ja palkkia tärytettiin hiukan. Tällaisella menettelyllä rajapinnasta saatiin melko selkeä ja suora, joskin jälleen sauman sijaintiin tuli luonnollisesti muutaman millimetrin heittoja.



Kuva 16. Palkin 2 valu ohuen metallilevyn avulla.

9.2.3 Koekappaleiden säilytys

Muottien purkamisen jälkeen yhden vuorokauden iässä normaalibetonia sisältäneet palkit siirrettiin suoraan kosteussäilytyshuoneeseen. Masuunikuonabetonia sisältäneet sekä erikoislujista betoneista valetut lämpökäsittelyyn tarkoitetut palkit laitettiin kahdeksi vuorokaudeksi 90 °C:n lämpökäsittelyyn. Toisin kuin kutistuma- ja virumakokeissa, lämpökäsitellyt kappaleet jätettiin vuorokaudeksi lämpöarkkuun jäähtymään lämmön poiskytkennän jälkeen. Tämä menettely katsottiin paremmaksi kuin kappaleiden siirtäminen styrox-laatikoihin jäähtymään, sillä kappaleiden koon vuoksi niiden liikuttelemisen kuumina ja tarpeeksi hitaan jäähtymisen takaaminen olisi ollut hankalaa. Jäähtyneet kappaleet siirrettiin kosteussäilytyshuoneeseen.

Seitsemän vuorokauden iässä kaikki kappaleet siirrettiin kosteussäilytyshuoneesta 65 %:n suhteelliseen kosteuspitoisuuteen ja 20 °C lämpötilaan, jossa niitä säilytettiin 28 vuorokauden ikään eli koestukseen saakka.

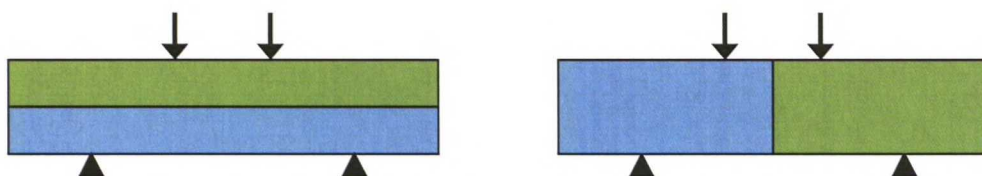
9.3 HYBRIDIRAKENNEKOEIDEN SUORITTAMINEN

9.3.1 Taivutus- ja leikkauslujuuskokeet

Palkeista 1 ja 2 ja vertailupalkeista A määritettiin taivutusvetolujuus Rakennus- ja ympäristötekniikan osaston koehallin Roell & Korthausin yleisaineenkoestuslaitteella standardin SFS-EN 12390-5 mukaan. Taivutuslujuuskokeessa palkki asetettiin laitteen kuormitustukien päälle samassa asennossa kuin se oli valettaessa, kuten kuvassa 17

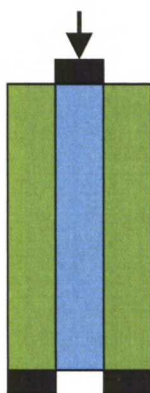
näky. Tällöin epätasainen valupinta jäi tietysti ylöspäin eli vasten kuormituksenjakajia, mikä ei ole yleensä toivottavaa, sillä epätasaisuudet saattavat vääristää koetuloksia. Standardin mukaan kuormitussuunnan tulisi olla valusuuntaa nähden kohtisuorassa. Koska tässä kokeessa oli kuitenkin kyseessä nimenomaan kappaleen eri betonikerrosten välisen sauman lujuusominaisuuksien tutkiminen, oli valusuunnassa kuormittaminen ainoa järkevä tapa. Myös vertailupalkit koestettiin valusuunnassa, jotta tulokset saataisiin mahdollisimman hyvin toisiaan vastaaviksi.

Ennen koetta sekä tuki- että kuormituspinnat kuitenkin hiottiin hiomakivellä mahdollisimman sileiksi. Kuormitustukien välinen etäisyys eli jänneväli oli 300 mm, ja kuormituksenjakajien välinen etäisyys 100 mm, ja ne asettuivat symmetrisesti palkin keskipisteen suhteen. Kun kappale oli asetettu huolellisesti tukien ja kuormituksenjakajien väliin, koe käynnistettiin. Kuormitusnopeus oli standardin mukainen $0,06 \text{ N/mm}^2\text{s}$.



Kuva 17. Palkkien 1 ja 2 kuormitusjärjestely.

Palkit 3 ja vertailupalkit B koestettiin Rakennusmateriaalitekniikan laboratorion Toni Technicin hydraulisella puristimella. Niistä määritettiin leikkauslujuus. Palkit 3 koestettiin pystysuorassa siten, että leikkausvoima pyrki erottamaan keskimmäisen lujan betonin kerroksen reunimmaisista normaalibetonikerroksista. Kuva 18 selventää tilannetta.



Kuva 18. Palkin 3 kuormitusjärjestely.

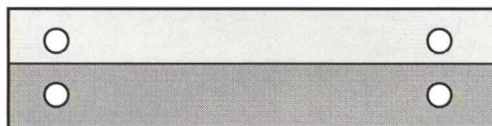
Kappale asetettiin kahden kuormitustuen päälle yllä olevan kuvan mukaan siten, että valupinta osoitti suoraan oikealle tai vasemmalle. Kuormitustuet siis tukivat kappaletta täsmälleen normaalibetonikerrosten kohdalta eli tukipinta-ala oli $50 \times 150 \text{ mm}^2$ kappaleen kummallakin puolella. Kuormitus puolestaan kohdistettiin ylhäältä kappaleen keskelle erikoislujan betonikerroksen kohdalta. Kuormituspinta-ala oli siis $50 \times 150 \text{ mm}^2$. Sekä kuormitustuet että kuormituksenjakaja olivat noin kaksi senttimetriä paksuja teräslevyjä. Kuormituksenjakajan ja koekappaleen väliin asetettiin lisäksi ohut vanerinpala tasoittamaan kappaleen mahdollisia epätasaisuuksia. Kappaleen kuormitus- ja tukipinta myös hiottiin ennen koestusta. Koejärjestely kehitettiin tätä koetta varten eikä siis ole varsinaisesti minkään standardin mukainen. Kuormitusnopeus oli 5 kN/s.

Vertailupalkki B koestettiin täysin vastaavasti kuin palkki 3, vaikka se ei muodostunutkaan eri betonikerroksista.

9.3.2 Palkin 1 kutistuman mittaus

Palkin 1 kutistumista seurattiin 28 vuorokauden ikään asti valun jälkeisenä päivänä liimattujen Demec-nastojen avulla. Mielenkiinnon kohteena olivat palkin 1 eri betonikerrosten erilaiset kutistumaominaisuudet sekä se, että aiheuttaako kerrosten erilainen kutistuminen mahdollisesti sauman heikentymistä eli kerrosten irtoamista toisistaan.

Nastat liimattiin symmetrisesti kappaleen kumpaankin päähän ja kummallekin puolelle sekä lujan että normaalibetonikerroksen kohdalle. Kutistumaa pystyttiin näin ollen seuraamaan samoista nastoista kahdessa eri suunnassa: kummankin kerroksen kutistumaa vaakasuunnassa ja kerrosten yhteistä kutistumaa pystysuunnassa. Mittareina käytettiin 400 mm ja 50 mm Demec-mittareita. Nastojen paikat näkyvät kuvassa 19.



Kuva 19. Palkin 1 kutistumanastat. Nastojen väli on vaakasuorassa 400 mm ja pystysuorassa 50 mm.

9.4 HYBRIDIRAKENNEKOKEIDEN TULOKSET

9.4.1 Taivutus- ja leikkauslujuuskokeiden tulokset

Palkkien 1, 2 ja A taivutuslujuustulokset ovat taulukoissa 13-15. Palkkien 3 ja B leikkauslujuustulokset ovat taulukoissa 16 ja 17. Palkin 3 ja vertailupalkin B lujuuden laskennassa on käytetty pinta-alaa 300 x 300 mm², joka on kahden 150 x 300 mm² kokoisien leikkauspinnan yhteenlaskettu ala. Kaikki hybridirakennekokeiden tulokset ovat liitteinä 12a ja 12b.

Taulukko 13. Palkin 1 taivutuslujuustulokset [MPa].

Palkki 1	1	2	3	4	5	6	ka	kh
C+F26/022/N	8,84	7,83	6,66	7,99	6,04	8,29	7,61	1,05
M+F26/022/H	4,42	13,16	14,34	10,32	7,17	14,95	10,73	4,23
C+F3/022/N	7,73	8,38	7,47	5,06	2,77	8,37	6,36	2,25
M+F3/022/H	8,74	5,82	6,45	11,26	4,84	7,27	7,40	2,31
C+F26/026/SAP/N	4,94	2,96	3,11	4,24	5,08	2,14	3,74	1,19
M+F26/026/SAP/H	3,37	2,79	2,92	4,25	3,36	5,85	3,76	1,15

Taulukko 14. Palkin 2 taivutuslujuustulokset [MPa].

Palkki 2	1	2	3	4	5	6	ka	kh
C+F26/022/N	2,61	4,19	2,77	2,17	2,77	3,52	3,00	0,73
M+F26/022/H	2,94	3,00	3,14	2,50	2,53	3,55	2,94	0,39
C+F3/022/N	2,83	3,44	3,20	3,06	3,23	3,01	3,13	0,21
M+F3/022/H	2,52	3,28	2,40	3,04	3,67	3,49	3,07	0,52
C+F26/026/SAP/N	3,47	3,58	3,45	3,44	3,29	3,13	3,39	0,16
M+F26/026/SAP/H	2,84	3,65	3,14	3,75	3,55	3,38	3,38	0,34

Taulukko 15. Vertailupalkin A taivutuslujuustulokset [MPa].

Palkki A	1	2	3	4	5	6	ka	kh
F26/022/N	9,89	9,62	9,31	9,15	9,50	8,69	9,36	0,42
F26/022/H	12,85	13,54	13,38	13,33	12,46	14,07	13,27	0,56
F3/022/N	7,42	7,55	6,65	6,49	8,09	6,43	7,10	0,68
F3/022/H	11,58	12,19	11,94	11,20	11,25	11,25	11,57	0,42
F26/026/SAP/N	6,69	6,42	5,90	6,93	6,51	6,86	6,60	0,41
F26/026/SAP/H	5,54	4,80	5,03	6,10	5,41	5,42	5,38	0,45
C	3,37	3,69	4,40	3,46	3,70	4,30	3,82	0,43
M H	3,84	4,05	3,34	3,29	3,72	3,65	3,65	0,29

Taulukko 16. Palkin 3 leikkauslujuustulokset [MPa].

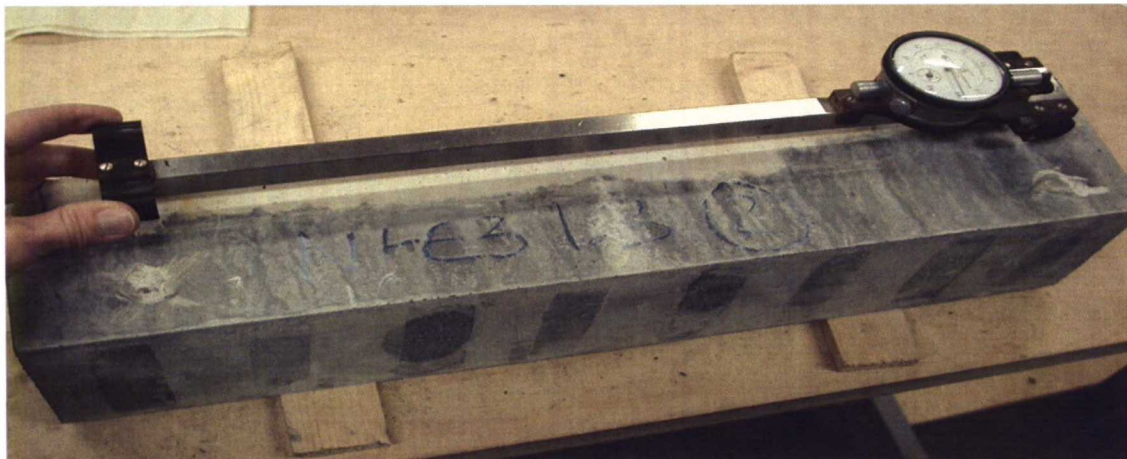
Palkki 3	1	2	3	4	5	6	ka	kh
C+F26/022/N	5,04	5,14	4,13	4,90	5,38	3,94	4,76	0,58
M+F26/022/H	5,14	4,48	4,81	4,45	5,45	4,67	4,83	0,39
C+F3/022/N	4,49	4,630	4,060	4,29	5,32	5,24	4,67	0,51
M+F3/022/H	3,98	5,30	4,42	5,03	5,51	5,87	5,02	0,70
C+F26/026/SAP/N	4,54	4,69	3,95	5,24	5,67	5,43	4,92	0,64
M+F26/026/SAP/H	6,57	5,01	5,28	5,87	4,14	5,63	5,42	0,82

Taulukko 17. Vertailupalkin B leikkauslujuustulokset [MPa]. Tulokset, jotka poikkeavat erityisen paljon sarjan muista tuloksista, on merkitty kursiivilla ja jätetty pois keskiarvosta ja hajonnasta.

Palkki B	1	2	3	4	5	6	ka	kh
F26/022/N	5,73	11,99	10,80	5,99	4,90	5,23	7,44	3,11
F26/022/H	8,38	14,58	9,63	8,95	11,97	8,76	10,38	2,42
F3/022/N	<i>13,69</i>	5,99	5,17	4,79	5,62	5,21	5,36	0,46
F3/022/H	7,51	7,42	8,87	7,96	8,42	13,84	9,00	2,43
F26/026/SAP/N	13,89	14,12	8,46	10,22	12,77	9,26	11,45	2,45
F26/026/SAP/H	17,33	<i>4,39</i>	13,07	15,46	16,55	14,49	15,38	1,68
C	3,48	3,33	3,40	3,31	3,47	3,15	3,36	0,12
M H	3,17	3,47	3,22	3,05	3,04	3,31	3,21	0,16

9.4.2 Palkin 1 kutistumatulokset

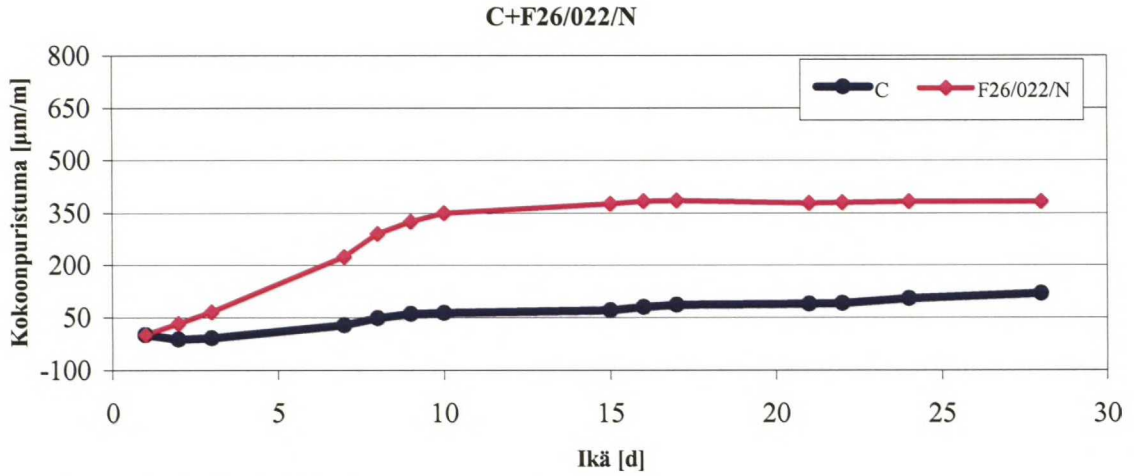
Tarkastellaan ensiksi 400 mm Demec-mittarilla saatuja tuloksia. Tällä mittarilla mitattiin erikseen molempien betonikerrosten kutistumaa kummaltakin puolelta palkkia. Mittauslinjoja oli siis neljä, joista esimerkkinä on esitetty linjan 1 mittaus kuvassa 20.



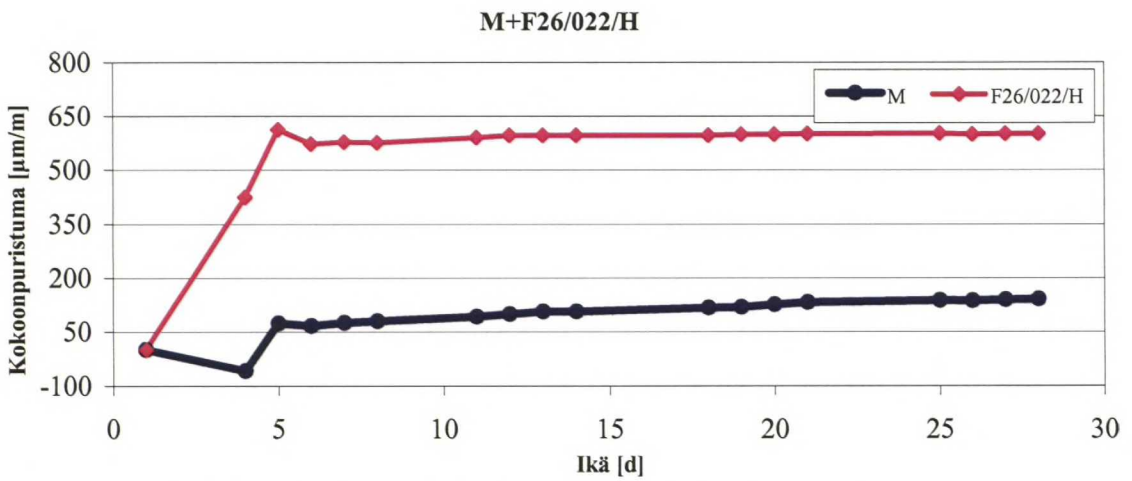
Kuva 20. Kutistuman mittaus normaali- ja masuunikuonabetonikerroksesta 400 mm Demec-mittarilla. Mittaus suoritettiin vastaavasti erikoislujasta kerroksesta sekä samalla tavalla symmetrisesti palkin toiselta puolelta.

Kuvissa 21-26 näkyvät kunkin erilaisen betoniyhdistelmän kutistumatulokset. Toinen käyrä kuvaa normaali- tai masuunikuonabetonikerroksen (mittauslinjat 1 ja 3) kutistumista ja toinen erikoislujan betonikerroksen (mittauslinjat 2 ja 4) kutistumista. Käyrät ovat keskiarvoja kolmen samanlaisen palkin mittauksista. Kolmen samanlaisen kappaleen tulokset olivat joka betoniyhdistelmällä hyvin samanlaiset, joten tulokset on luonnollista esittää keskiarvona. Mitta-asteikko on kaikissa kuvissa sama, jotta eri käyrien suuruusluokkaerot olisi helppo heti nähdä. Kaikki hybridipalkkien kutistumamittausten tulokset ovat liitteinä 13-15.

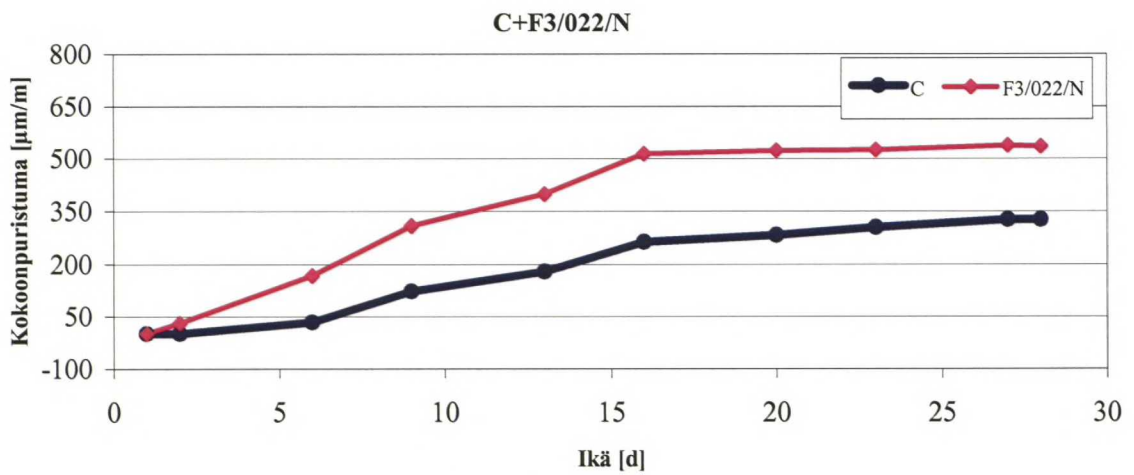
Joitakin nastoja irtosi palkeista jo muutaman päivän mittauksen jälkeen. Näistä nastoista saatuja muutamia tuloksia ei ole otettu mukaan kuvaajiin tai keskiarvoihin. Nastojen irtoaminen tapahtui kaikissa tapauksissa normaalilujuuksisesta betonikerroksesta, joten se johtui luultavasti siitä että nastojen liimaamishetkellä betonin pinta oli vielä murenevaa ja pehmeäköhköä.



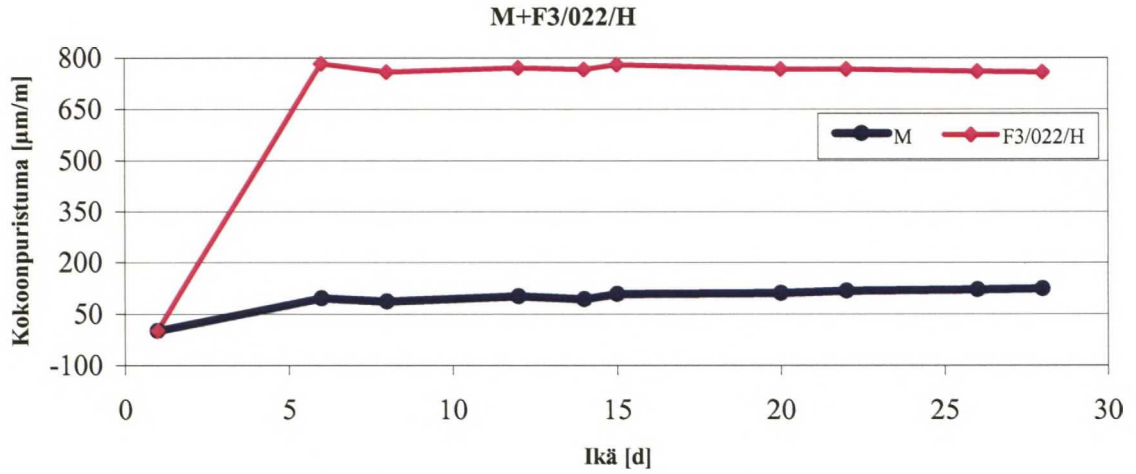
Kuva 21. Palkin C+F26/022/N eri betonikerrosten kutistumat.



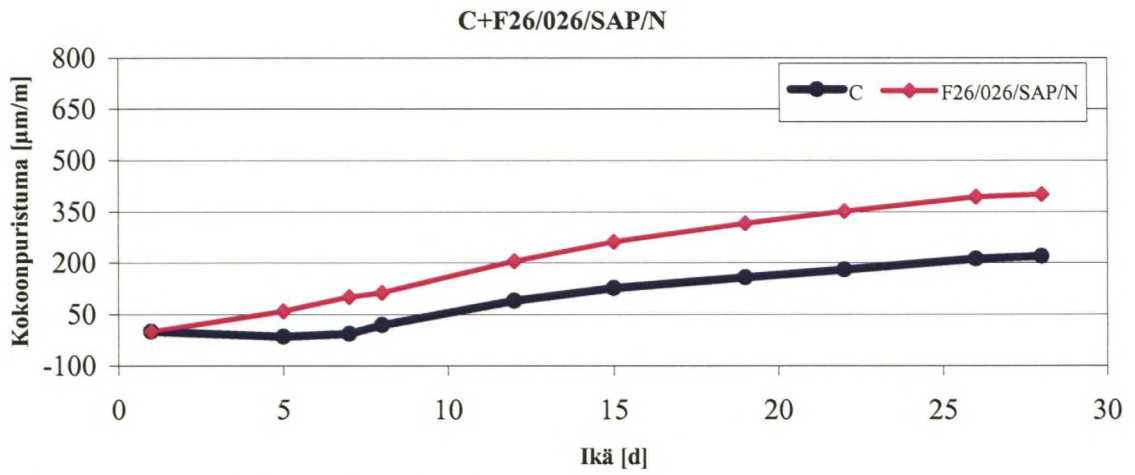
Kuva 22. Lämpökäsitellyn palkin M+F26/022/H eri betonikerrosten kutistumat.



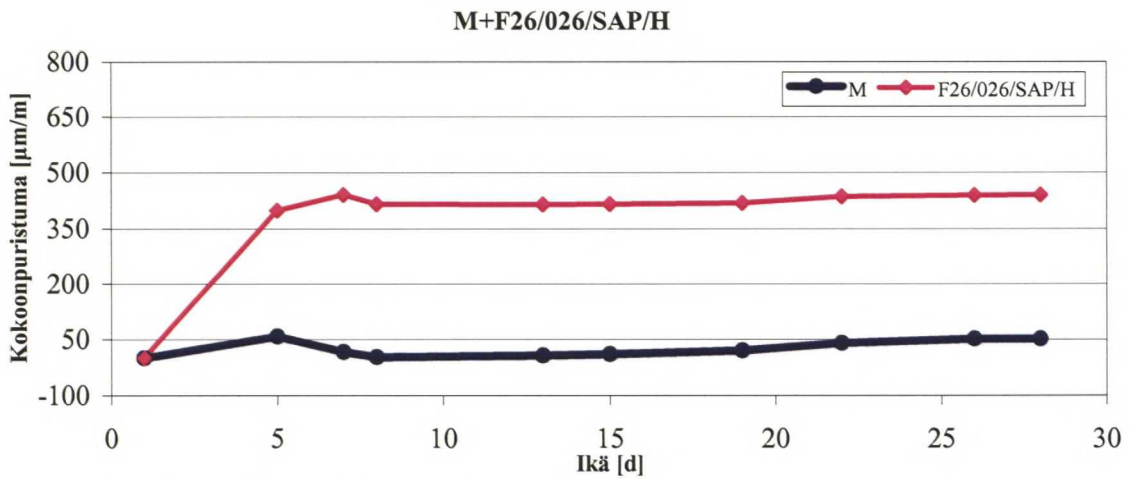
Kuva 23. Palkin C+F3/022/N eri betonikerrosten kutistumat.



Kuva 24. Lämpökäsitellyn palkin M+F3/022/H eri betonikerrosten kutistumat.

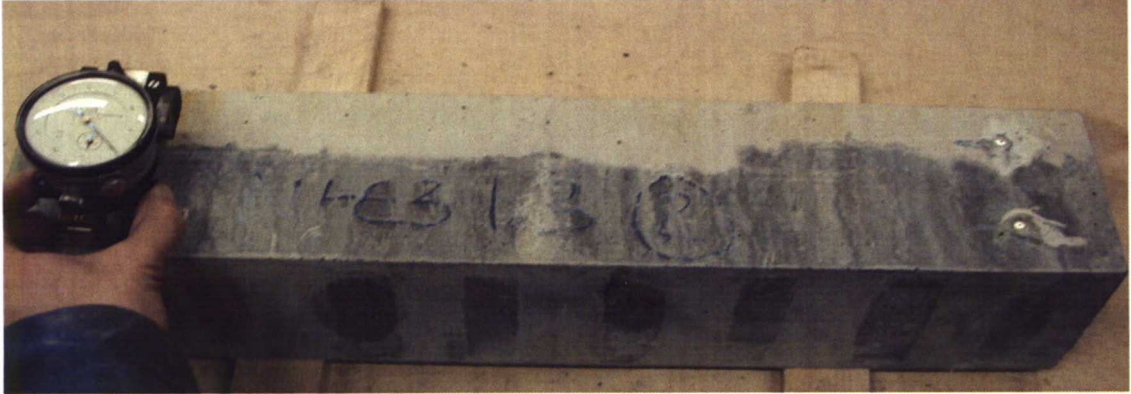


Kuva 25. Palkin C+F26/026/SAP/N eri betonikerrosten kutistumat.

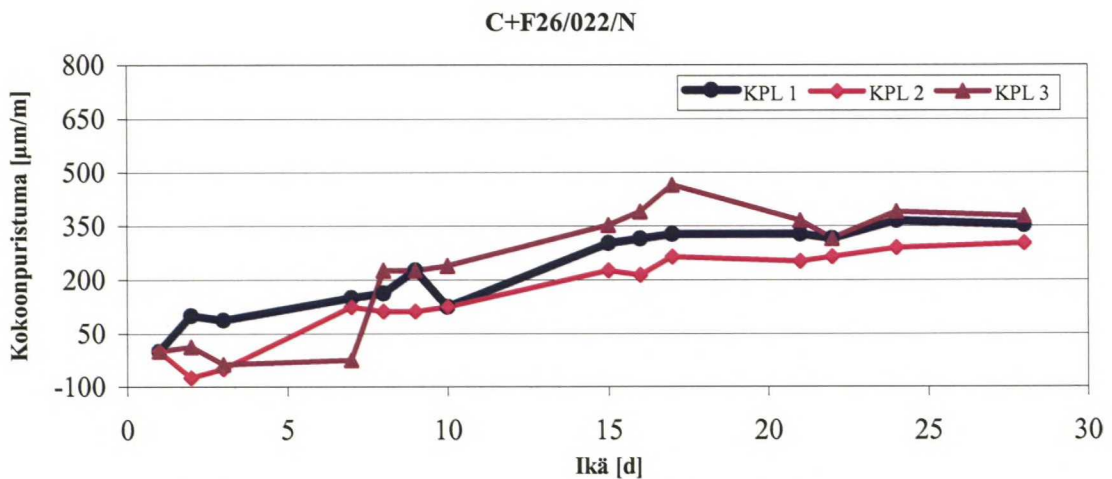


Kuva 26. Lämpökäsitellyn palkin M+F26/026/SAP/H eri betonikerrosten kutistumat.

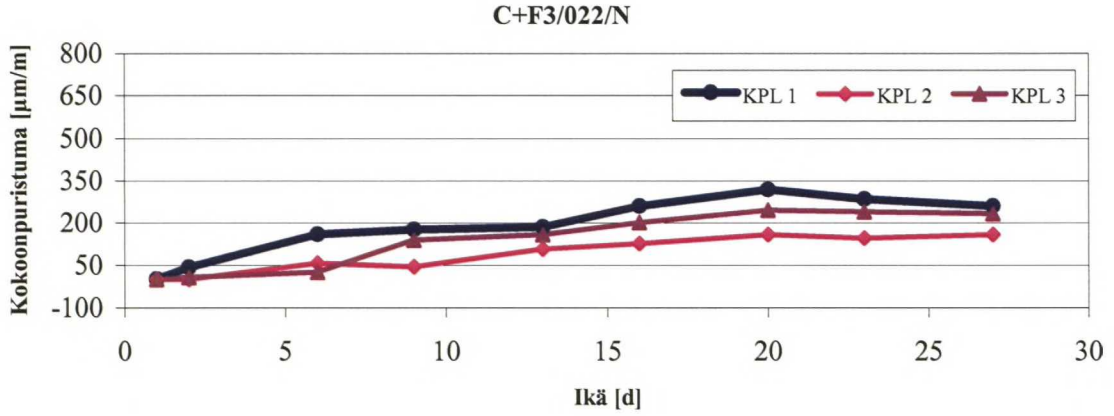
Seuraavaksi tarkastellaan 50 mm Demec-mittarilla saatuja tuloksia. Kuvassa 27 näkyy linjan 1 mittaus. Hybridipalkista M+F26/022/H ei ole 50 mm Demec-mittarin tuloksia. Kutistumatulokset esitetään kuvissa 28-32, joissa näkyvät erikseen kunkin palkkityypin kolmen samanlaisen koekappaleen kutistumat. Käyrät ovat keskiarvoja kyseisen koekappaleen neljästä mittalinjasta.



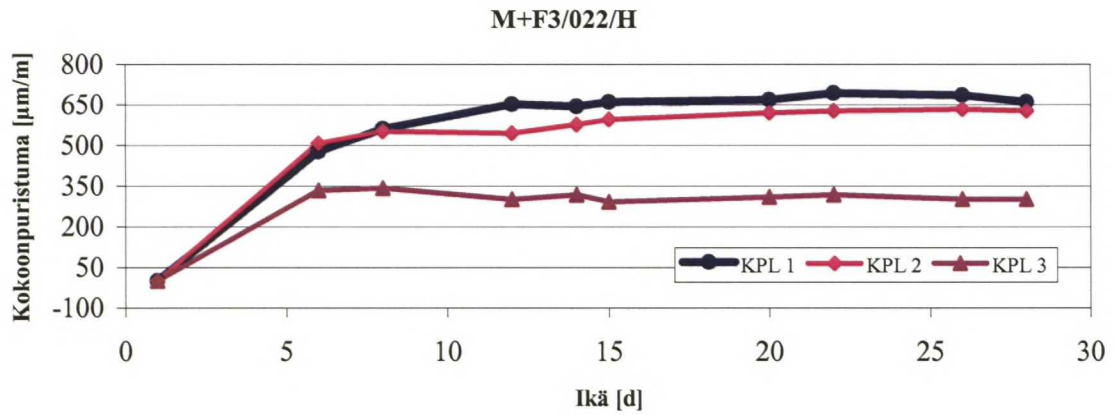
Kuva 27. Kutistuman mittaus linjasta 1 50 mm Demec-mittarilla. Mittaus suoritettiin vastaavasti palkin toisesta päästä sekä symmetrisesti palkin toiselta puolelta.



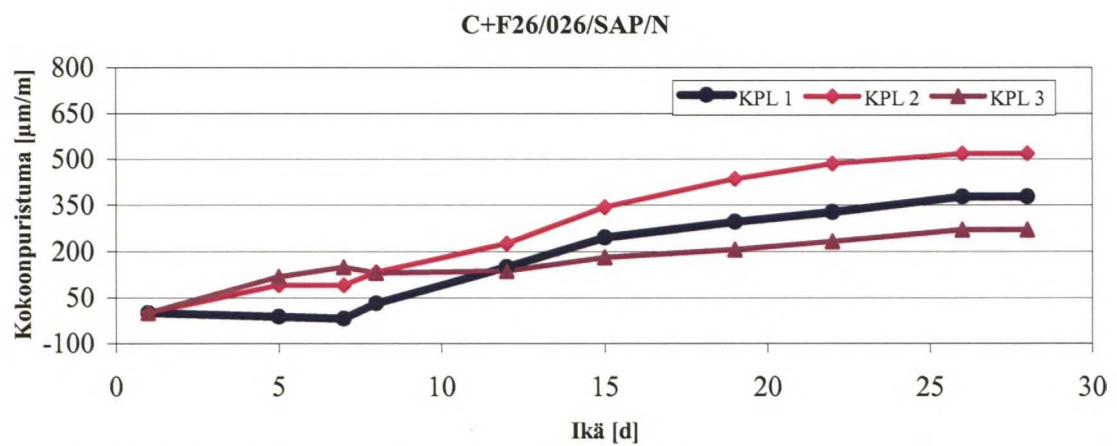
Kuva 28. Palkin C+F26/022/N kerrosten rajapintaan nähden kohtisuora kutistuma.



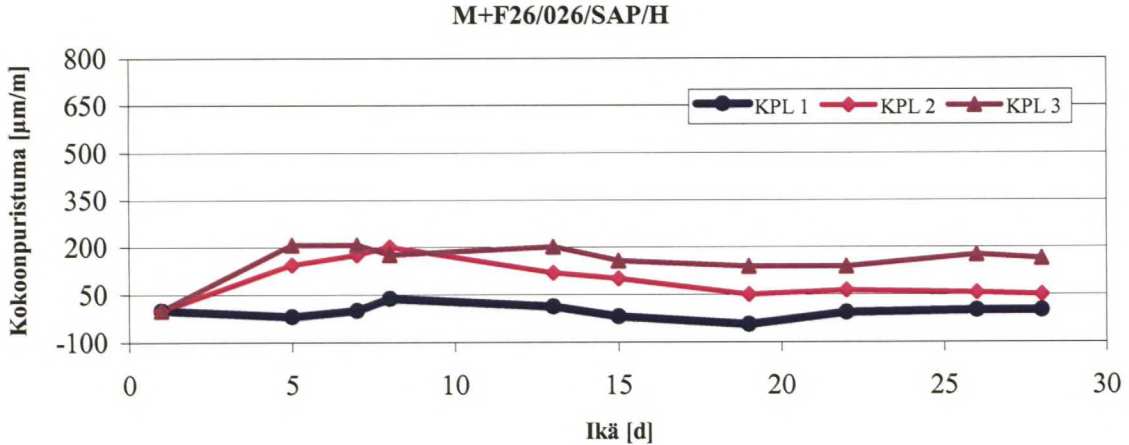
Kuva 29. Palkin C+F3/022/N kerrosten rajapintaan nähden kohtisuora kutistuma.



Kuva 30. Palkin M+F3/022/H kerrosten rajapintaan nähden kohtisuora kutistuma. Kappaleiden 1 ja 2 neljän kutistumakäyrän hajonta oli iso.



Kuva 31. Palkin C+F26/026/SAP/N kerrosten rajapintaan nähden kohtisuora kutistuma. Kappaleen 2 käyrästä on jätetty pois yhden mittauslinjan tulokset, jotka poikkesivat oleellisesti muista luultavasti mittausvirheen takia.



Kuva 32. Palkin M+F26/026/SAP/H kerrosten rajapintaan nähden kohtisuora kutistuma. Kappaleiden 2 ja 3 neljän kutistumakäyrän hajonta oli iso.

9.5 HYBRIDIRAKENNEKOKEIDEN TULOSTEN TARKASTELU

9.5.1 Yleistä

Tuloksia tarkasteltaessa on muistettava, että vertailupalkkien tulokset eivät täydellisesti vastaa hybridipalkkien tuloksia vaikka koestusmenetelmät olivatkin täysin samanlaiset. Tämä johtuu siitä, että vertailupalkkeja ei valettu kerroksittain kuten hybridipalkit, vaan muotit täytettiin ilman keinotekoisia valutaukoja tai kerrostuksia yhdessä tai kahdessa osassa. Vertailupalkit antavatkin tietoa lähinnä tutkimuksessa käytetyistä betoneista ja niiden kestävydestä taivutus- ja leikkauslujuuskokeissa. Toki niiden tuloksista saadaan jonkinlaista vertailumateriaalia hybridipalkkien lujuusominaisuuksia arvioitaessa.

Sekä taivutusvetolujuus- että leikkauskokeiden tulokset hybridibetonikokeissa olivat hyviä, mutta ominaista lähes kaikille kokeille oli suuri keskihajonta. Tuloksiin voidaan kuitenkin olla tyytyväisiä, kun otetaan huomioon että lähtötilanteessa varauduttiin myös hybridipalkkien osoittautumiseen täysin kestäättömiksi. Yleisenä tuloksena nähdään jälleen, että lämpökäsitellyt kappaleet olivat lujempia kuin lämpökäsittelemättömät.

Yksittäisissä tuloksissa keskihajontaa oli todellakin paljon. Kuuden kappaleen sarjasta vaikkapa vain yksi tulos saattoi poiketa muista saman sarjan tuloksista huomattavasti joko parempaan tai huonompaan suuntaan. Hajontaan saattoivat vaikuttaa monet tekijät, kuten epätasaisuudet lujissa koekappaleissa tai koestuslaitteisto ja koestusjärjestelyt, joita sovellettiin näille kappaleille sopiviksi.

Kappaleiden keskittäminen koestuslaitteisiin tapahtui silmämääräisesti ja mitan avulla, joten on selvää ettei jokainen kappale ollut täysin samassa kohdassa tai aivan keskellä koestuslaitetta. Sitä, onko näillä muutaman millimetrin heitoilla vaikutusta tuloksiin, on mahdotonta sanoa, mutta koska on kyse erikoislujasta betonista, asia on todettava yhtenä mahdollisena keskihajontaa aiheuttaneena tekijänä.

Palkeilla 1 ja 2 keskihajontaan vaikutti todennäköisesti eniten se, että yleensä taivutusvetolujuuskappaleita säilytetään märässä tilassa koestukseen saakka. Tämän tutkimuksen kappaleet olivat koestettaessa kuivia. Säilytyksessä ja kappaleita liikuteltaessa niihin on saattanut kohdistua pieniä kolauksia, jotka ovat voineet aiheuttaa mikrohalkeamia kuivaan kappaleeseen. Koestuksessa tällaiset halkeamat ilmenevät heti heikkoina kohtina. Keskihajonta näyttääkin suurelta erityisesti erikoislujilla kappaleilla, joilla päästään hyvinkin korkeisiin lujuuksiin mikäli haitallisia mikrohalkeamia ei tapahdu ennen koestusta.

On myös huomioitava, että standardin ohjeen vastaisesti taivutuslujuuskoestus tehtiin valusuunnassa, jolloin kappaleen rosainen yläpinta oli vasten kuormitusta. Vaikka pinnasta hiotaan suurimmat epätasaisuudet pois, saattaa rosoisuudella olla vaikutusta kokeen tuloksiin, kun sekä kuormittava että kuormitettava pinta ovat niin kovia. Epätasaisuuksien vaikutusta lieventänee kuitenkin hieman se, että kuormitustuet ja kuormituksenjakajat oli peitetty kumipehmusteilla.

Palkeilla 1 ja 2 betonien välisen sauman kohta määräytyi valettaessa melko silmämääräisesti. Vaikka sauma keskitettiin mahdollisimman tarkasti mittalevyjen ja mitan avulla, on selvää että jokainen kappale on yksilö. Kerroksen korkeus eri kappaleissa vaihteli muutaman millimetrin tarkkuudella. Hybridikappaleet tehtiin kahdesta omalla tavallaan käyttäytyvästä ja erilujuuksisesta massasta, joten kenties on syytä pohtia vaikuttaako betonien määrien keskinäisen suhteen vaihtelu kappaleen lujuuteen. Esimerkiksi palkin 1 taivutuskokeessa alapinta määrää pitkälti palkin lujuuden eli vaikuttaa taivutuskestävyyteen enemmän kuin ylempi kerros. Siispä on kenties mahdollista, että lujan betonin määrä eli alemman kerroksen paksuus vaikuttaa lujuustulokseen.

Myöskään kerrosten saumasta ei ollut mahdollista saada täysin suoraa, vaikka lujan kerroksen jähmettymistä odoteltiinkin ennen ylemmän kerroksen valua. Karkeasta runkoaineesta valmistettu massa tunkeutui joka tapauksessa jossain määrin lujan massan

sisään, jolloin massat sekoittuivat vaihtelevasti saman kappaleen eri kohdissa. Toisaalta voisi olla mahdollista, että kappaleilla joilla erikoislujan kerroksen pinta oli ehtinyt jähmettyä enemmän, kerrosten välinen tartunta oli heikompi.

Palkeilla 3 tulosten hajontaa ovat voineet aiheuttaa pinnan epätasaisuudet ja epätarkkuus kuorman keskittämisessä. Vaikka nämäkin kappaleet hiottiin huolella, ei pintaa pystynyt välttämättä saamaan käsin hiomalla täysin suoraksi, etenkin kun kyseessä oleva betoni on niin kovaa. Muutamassa tapauksessa oli todettavissa, että kappaleen koko pääty oli epäsuora. Tämä johtui luultavasti siitä, että vanerilevystä valmistetut muotit eivät olleet pysyneet täysin muodossaan valettaessa tai että ne oli puhdistuksen jälkeen koottu hieman vinoiksi. Ei voida suoraan päätellä, että esimerkiksi tällä seikalla olisi ollut vaikutusta tulosten hajontaan, mutta se on mahdollista. On jälleen muistettava, että erikoisluja betonikappale ei anna kuorman alla juurikaan periksi epätasaisista kohdistaan, vaan pienikin nystyrä tai pinnan kieroutuma voi ottaa koko kuorman itselleen, kunnes halkeama syntyy. On selvää, että lujuustulos ei tällöin ole yhtä hyvä kuin tavoitetilanteessa, jossa kuorma jakautuu koko kuormituspinnalle.

Seuraavassa luvussa eli ennen varsinaisten koetulosten tarkastelua käsitellään tilastollisen tarkastelun periaatteet ja tulokset. Tilastollisen testauksen tuloksia arvioidaan tarkemmin kuitenkin vasta varsinaisten koetulosten käsittelyn yhteydessä, jotta kokonaisuus olisi selkeämpi.

9.5.2 Tilastollinen tarkastelu

Hybridipalkkien tilastollinen tarkastelu suoritetaan joka palkkityypille erikseen. Tarkastelussa käytetään kahden riippumattoman otoksen t-testiä riskitasolla 0,05 (Laininen, 1998). Testin avulla tutkitaan, onko erilaisilla lujilla betonikerroksilla tilastollisesti merkitsevää vaikutusta hybridipalkin taivutus- tai leikkauslujuuteen sekä vaikuttaako lämpökäsittely tietyistä betoneista valmistetun hybridipalkin lujuuteen lämpökäsittlemättömään verrattuna. Testissä on oletuksena, että otosten varianssit ovat erisuuret. Yhdessä koesarjassa oli aina 6 koekappaletta.

Testisuure t_0 lasketaan kullekin vertailtavalle parille yhtälöllä

$$t_0 = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (2)$$

jossa X_1 ja X_2 ovat testattavien koesarjojen koetulosten keskiarvot,
 n_1 ja n_2 ovat testattavien koesarjojen yksittäisten tulosten lukumäärät ja
 s_1 ja s_2 ovat testattavien koesarjojen keskihajonnat.

Vapausaste v laskettiin kaavalla

$$v = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}} \quad (3)$$

Riskitason 0,05 ja kullekin vertailuparille lasketun vapausasteen avulla luetaan kussakin tarkastelussa t -jakauman taulukosta hyväksymisraja t_p . Jos laskennassa saatavan testisuureen t_0 itseisarvo on suurempi kuin hyväksymisraja, keskiarvojen ero on tilastollisesti merkitsevä eli ei johdu sattumasta 95 %:n todennäköisyydellä. Jos raja ei ylity, ero ei ole tilastollisesti merkitsevä.

Alla olevissa taulukoissa t -testi on suoritettu Microsoft Excel -ohjelman avulla, joten tulokset näkyvät p -arvoina. P -arvo kuvaa sitä todennäköisyyttä, jolla vertailtavissa keskiarvoissa ei ole merkittävää eroa. P -arvoja voidaan nyt verrata suoraan riskitasoon 0,05. Jos p -arvo alittaa riskitason, nollahypoteesi hylätään eli keskiarvojen erotus on tilastollisesti merkitsevä. Jos p -arvo ylittää riskitason, nollahypoteesi jää voimaan eli keskiarvoissa ei ole merkitsevää eroa. Taulukossa 18 on taivutuslujuuskokeiden tulosten tarkastelu ja taulukossa 19 leikkauslujuuskokeiden tulosten tarkastelu.

Taulukoissa on merkitty tummennetulla fontilla niiden vertailuparien p -arvot, joilla keskiarvojen eroa voidaan pitää todellisena eli tilastollisesti merkittävänä. Taulukoissa esimerkiksi vertailupari C+F26/022/N - C+F3/022/N tarkoittaa, että palkin

C+F26/022/N lujuustulosten keskiarvoa on verrattu palkin C+F3/022/N tulosten keskiarvoon.

Leikkauslujuustuloksista jätettiin huomioimatta betonin F3/022/N muita tuloksia huomattavasti parempi tulos sekä betonin F26/026/SAP/H muita huomattavasti huonompi tulos. Tämä vaikutti oleellisesti t-testinkin tuloksiin. Tuloksia arvioidaan tarkemmin vasta seuraavissa luvuissa koetulosten tarkastelun yhteydessä.

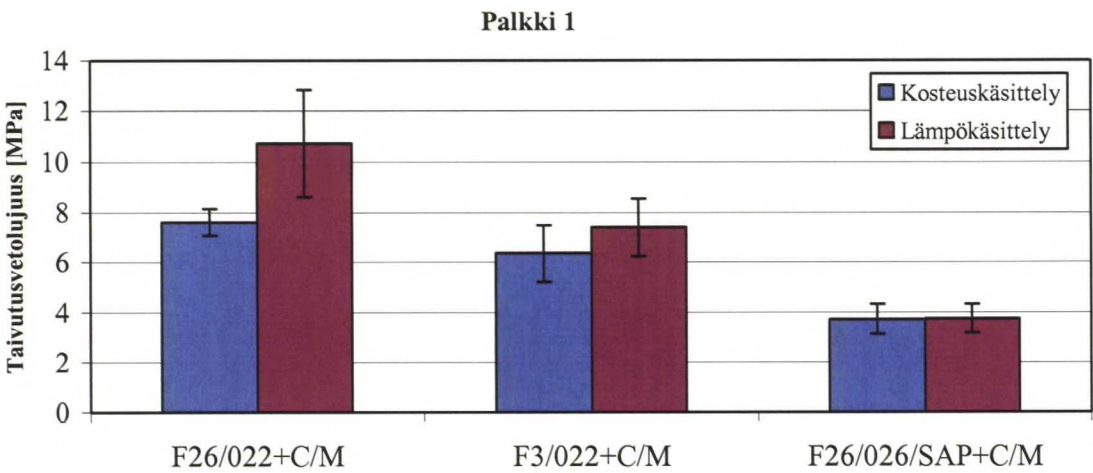
Taulukko 18. T-testillä suoritettu taivutuslujuustulosten tilastollinen tarkastelu. Tummennetut p-arvot kuvaavat tilastollisesti merkitsevää (p-arvo < 0,05) eroa vertailuparin keskiarvoissa.

Palkki 1	p-arvo	Palkki 2	p-arvo	Palkki A	p-arvo
C+F26/022/N - C+F3/022/N	0,37	C+F26/022/N - C+F3/022/N	0,70	F26/022/N - F26/022/H	0,00
C+F26/022/N - C+F26/026/SAP/N	0,00	C+F26/022/N - C+F26/026/SAP/N	0,25	F3/022/N - F3/022/H	0,00
C+F3/022/N - C+F26/026/SAP/N	0,03	C+F3/022/N - C+F26/026/SAP/N	0,03	F26/026/SAP/N - F26/026/SAP/H	0,00
M+F26/022/H - M+F3/022/H	0,13	M+F26/022/H - M+F3/022/H	0,65	F26/022/N - F3/022/N	0,00
M+F26/022/H - M+F26/026/SAP/H	0,01	M+F26/022/H - M+F26/026/SAP/H	0,07	F26/022/N - F26/026/SAP/N	0,00
M+F3/022/H - M+F26/026/SAP/H	0,01	M+F3/022/H - M+F26/026/SAP/H	0,24	F3/022/N - F26/026/SAP/N	0,12
C+F26/022/N - M+F26/022/H	0,13	C+F26/022/N - M+F26/022/H	0,86	F26/022/H - F3/022/H	0,00
C+F3/022/N - M+F3/022/H	0,57	C+F3/022/N - M+F3/022/H	0,79	F26/022/H - F26/026/SAP/H	0,00
C+F26/026/SAP/N - M+F26/026/SAP/H	0,99	C+F26/026/SAP/N - M+F26/026/SAP/H	0,96	F3/022/H - F26/026/SAP/H	0,00

Taulukko 19. T-testillä suoritettu leikkauslujuustulosten tilastollinen tarkastelu. Tummennetut p-arvot kuvaavat tilastollisesti merkitsevää (p-arvo < 0,05) eroa vertailuparin keskiarvoissa.

Palkki 3	p-arvo	Palkki B	p-arvo
C+F26/022/N - C+F3/022/N	0,80	F26/022/N - F26/022/H	0,10
C+F26/022/N - C+F26/026/SAP/N	0,65	F3/022/N - F3/022/H	0,01
C+F3/022/N - C+F26/026/SAP/N	0,48	F26/026/SAP/N - F26/026/SAP/H	0,01
M+F26/022/H - M+F3/022/H	0,59	F26/022/N - F3/022/N	0,16
M+F26/022/H - M+F26/026/SAP/H	0,16	F26/022/N - F26/026/SAP/N	0,03
M+F3/022/H - M+F26/026/SAP/H	0,39	F3/022/N - F26/026/SAP/N	0,00
C+F26/022/N - M+F26/022/H	0,79	F26/022/H - F3/022/H	0,35
C+F3/022/N – M+F3/022/H	0,35	F26/022/H - F26/026/SAP/H	0,00
C+F26/026/SAP/N - M+F26/026/SAP/H	0,27	F3/022/H - F26/026/SAP/H	0,00

9.5.3 Taivutuslujuustulosten tarkastelu



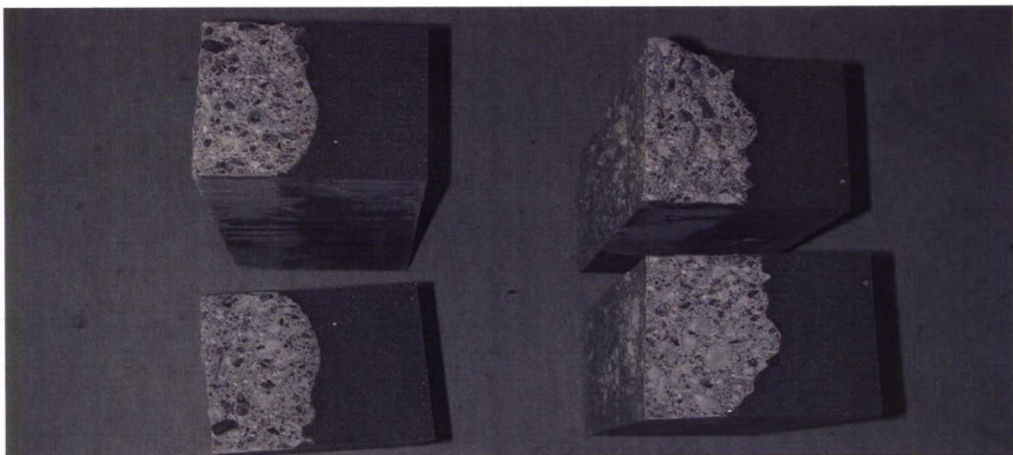
Kuva 33. Palkin 1 taivutuslujuustulokset ja hajonnat.

Palkeilla 1 paremmuusjärjestys noudatteli puristuslujuustuloksista tuttua linjaa: lujaa betonia F26/022 sisältäneet palkit saivat parhaat taivutuslujuustulokset ja betonia

F26/026/SAP sisältäneet palkit kestivät selkeästi heikoimmin. Erityisen hyvä tulos saatiin yhdistelmällä M+F26/022/H eli lämpökäsitellyllä betonilla F26/022/H sisältäneellä palkilla. Muillakin yhdistelmillä lämpökäsitelty versio oli paras, tosin betonilla F26/026/SAP sisältäneillä palkeilla ero lämpökäsitellyn ja -käsittelemättömän välillä oli olematon.

Tilastollisen tarkastelun mukaan betonilla F26/026/SAP sisältäneiden palkkien keskiarvot erosivat merkitsevästi betonilla F26/022 tai F3/022 sisältäneiden palkkien keskiarvoista sekä lämpökäsitellyillä että lämpökäsittelemättömillä kappaleilla. T-testin mukaan betonilla F26/022 ja F3/022 sisältäneet palkit eivät puolestaan eronneet toisistaan tilastollisesti merkittävästi. Näin voitaisiin päätellä, että polymeeria sisältäneet betonista F26/026/SAP valmistetut palkit olivat todella heikompia kuin muista erikoislujista betoneista valmistetut palkit.

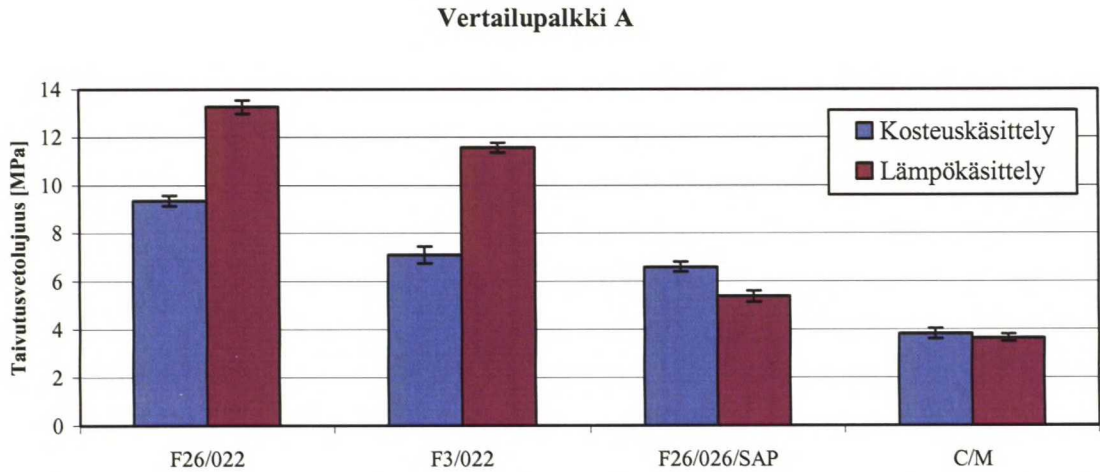
Palkilla M+F26/022/H oli kuitenkin yksi tulos, joka oli jonkin verran sarjan muita tuloksia huonompi (4,42 MPa). Tämä tulos on nyt otettu mukaan tarkasteluun sillä hajonta on muutoinkin sarjassa melko suuri. Jos kyseinen tulos jätettäisiinkin huomioimatta, keskiarvojen ero tulisi tilastollisesti merkitseväksi palkkien M+F26/022/H ja M+F3/022/H välillä sekä palkkien C+F26/022/N ja M+F26/022/H välillä. Muutoin t-testin perusteella näyttäisi siltä, että samaa lujaa betonilla sisältävien palkkien lujuus ei riipu merkittävästi siitä, ovatko palkit lämpökäsiteltyjä vai ei.



Kuva 34. Kaksi palkkia 1 koestuksen jälkeen. Kuvasta näkyy, kuinka normaalibetoni on valutauosta huolimatta hieman painunut erikoislujan betonin sekaan.

Vertailupalkit A valmistettiin vain yhdestä massasta, eikä muotteja myöskään täytetty kerroksittain keinotekoisilla valutauoilla. Vertailukappaleisiin ei siis muodostunut

mitään saumakohtia eli niissä ei ollut minkäänlaisia kerroksia kuten hybridikappaleissa. Vertailupalkkien A taivutuslujuustulokset tukevat kuitenkin palkkien 1 tuloksia. Betonista F26/022 valmistetut kappaleet olivat parhaimpia ja betonista F26/026/SAP valmistetut heikoimpia, kuten alla olevasta kuvasta näkee.



Kuva 35. Vertailupalkkien A taivutuslujuustulokset [MPa] ja hajonnat lämpökäsitellyille ja lämpökäsittelemättömille palkeille.

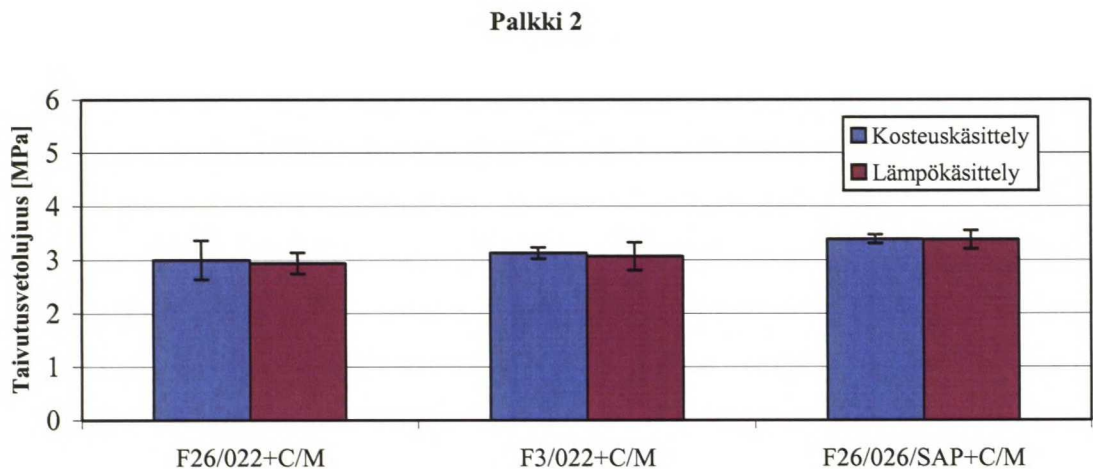
Vertailupalkkien lujuudet olivat kuitenkin huonompia kuin projektin muissa taivutuskokeissa saadut tulokset. Tähän vaikuttaa koekappaleiden säilytys. 95 % kosteudessa palkit imevät itseensä kosteutta ja hydrataatio voi jatkua. Tässä tapauksessa palkit siirrettiin viikon ikäisinä kuivaan tilaan eli 65 % kosteuteen, jolloin hydrataatio päättyi ja lujuus jäi heikommaksi kuin määrässä säilytetyillä palkeilla. Esimerkiksi betonien F26/022/N ja F26/022/H tulokset olivat tässä kokeessa 9,4 ja 13,3 MPa, kun märkinä vastaaville palkeille on saatu tulokset 13,3 ja 14,6 MPa.

Betonista F26/026/SAP/H valmistetun lämpökäsitellyn palkin taivutuslujuustulos erottuu joukosta huomattavan heikkona (5,4 MPa). Koe uusittiin myöhemmin neljällä palkilla tuloksen varmistamiseksi. Neljän palkin keskiarvoksi saatiin 4,43 MPa eli uusintakoe vahvisti ensimmäisen kokeen tulokset.

Tilastollisen tarkastelun perusteella eri betoneista valmistetut palkit voidaan todella asettaa paremmuusjärjestykseen, sillä kaikkien vertailuparien keskiarvoilla todettiin olevan tilastollisesti merkitsevää eroa. Ainoa poikkeus olivat lämpökäsittelemättömät betonit F3/022/N ja F26/026/SAP/N, joiden lujuuksien välillä ei ollut todellista eroa. T-testin perustella voidaan myös päätellä, että lämpökäsittely parantaa kunkin betonin taivutuslujuutta merkittävästi.

Normaalilujuuksisiin betoneihin verrattuna erikoislujien betonien taivutuslujuus on lämpökäsitellyillä palkeilla parhaimmillaan yli kolminkertainen ja lämpökäsittelemättömillä palkeilla noin kaksinkertainen.

Palkkien 2 tulokset olivat hyvin lähellä toisiaan (noin 3 MPa). Voidaan siis todeta, että lujan betonin laadulla ei tämän palkkityypin tapauksessa ollut juurikaan merkitystä. Huomattavaa on myös se, ettei lämpökäsittelyllä näytä olevan oleellista vaikutusta tämäntyyppisen palkin taivutuslujuuteen. Palkin heikoin kohta on eri betonien välinen sauma, jonka kestävyys määrää normaalilujuuksisen betonin kestävyys. Se puolestaan oli käytännössä sama sekä normaali- että masuunikuonabetonilla lämpökäsittelystä huolimatta. Palkit 2 kestivät taivutusta siis lähes saman verran kuin normaali- tai masuunikuonabetonista valmistetut vertailupalkit A. Palkin katkeaminen tapahtui useimmiten tarkasti sauman kohdalta.



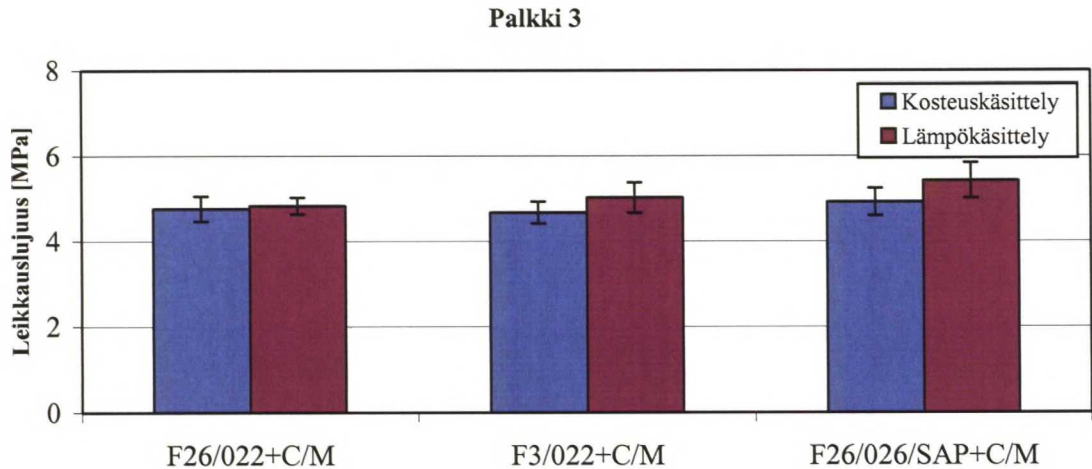
Kuva 36. Palkkien 2 taivutuslujuustulokset [MPa] ja hajonnat.

Yllä olevasta kaaviosta kuitenkin nähdään, että betonista F26/026/SAP valmistetut kappaleet saavuttivat parhaan lujuuden sekä lämpökäsittelemättöminä että -käsiteltyinä. Todennäköisin syy tähän voisi olla polymeerin toiminta. Vaikuttaa siltä, että polymeeri imee betonien saumakohdassa itseensä kosteutta viereisestä normaalilujuuksisesta betonista, jolloin heikomman betonin vesisementtisuhde pienenee, mikä puolestaan vaikuttaa kokonaislujuuteen positiivisesti.

Tilastollinen tarkastelu vahvistaa, että eri betoniyhdistelmien antamilla lujuuksilla ei tosiaan ole merkitsevää eroa, ja että lämpökäsittely ei tällaisella palkilla paranna palkin lujuutta. Poikkeuksena on kuitenkin palkki C+F26/026/SAP/N, joka oli testin mukaan merkitsevästi parempi kuin palkki C+F3/022/N. Huomattavaa on myös, että palkilla

C+F26/022/N oli yksi muita sarjan tuloksia selkeästi parempi tulos (4,19 MPa), joka suurentaa sarjan hajontaa. Mikäli tämä tulos jätetään tarkastelusta pois, palkki C+F26/026/SAP/N on t-testin mukaan myös palkkia C+F26/022/N merkitsevästi lujempi.

9.5.4 Leikkauslujuustulosten tarkastelu



Kuva 37. Palkkien 3 leikkauslujuustulokset [MPa] ja hajonnat.

Kaavion mukaan näyttäisi siltä, että **palkkeilla 3** betonia F26/026/SAP sisältäneet koekappaleet olisivat leikkauslujuusominaisuuksiltaan parhaita. Hyvän tuloksen antavan tekijän voitaisiin päätellä olevan betonin F26/026/SAP polymeeri, kuten edellisessä luvussa palkkien 2 tulosten arvioinnissa on päätelty. Tilastollinen tarkastelu kuitenkin osoittaa, että kaikkien palkkien 3 tulokset olivat lujasta betonista tai lämpökäsittelystä riippumatta niin lähellä toisiaan, että tilastollisesti merkitsevää eroa ei ole. Yksittäisiä tuloksia ja sarjojen keskiarvoja tarkastellessa lämpökäsittelyn palkin M+F26/026/SAP/H lujuudet näyttävät parhailta, mutta on huomattava, että kyseisen sarjan hajonta on suurempi kuin muilla sarjoilla. Tämä vaikuttaa t-testillä saatuun tulokseen siten, että tätä palkkia ei voida yksiselitteisesti päätellä paremmaksi kuin muut palkit.

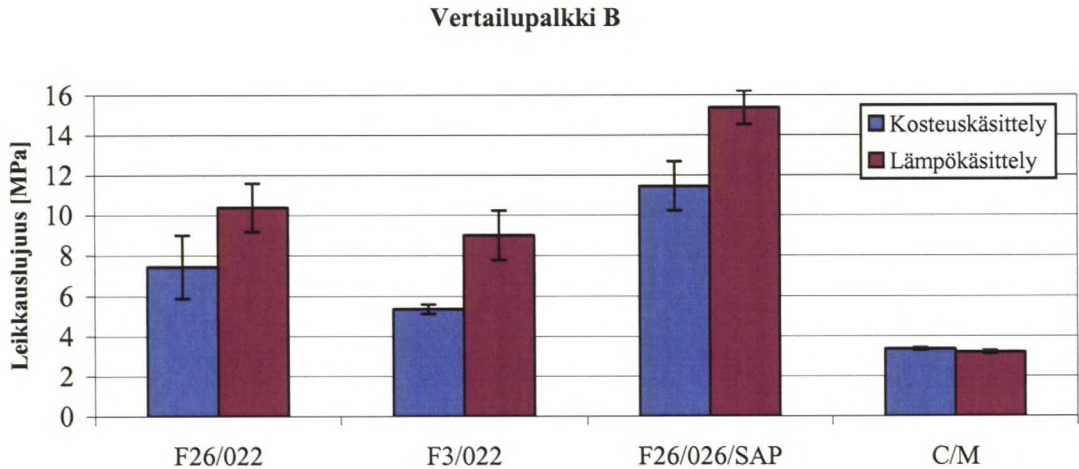
Palkit 3 leikkautuivat useimmiten odotusten mukaisesti normaalilujuuksisen betonin kohdalta. Halkeamat alkoivat ylhäältä suoraan lujan kerroksen molemmiin puoliin ja jatkuivat melko suoraan alas asti. Esimerkillinen leikkautuminen näkyy kuvassa 38.



Kuva 38. Palkki 3 koestuksen jälkeen.

Vertailupalkeilla B betonista F26/026/SAP valmistetut kappaleet kestivät leikkautumista selvästi parhaiten. Huonoimmat tulokset saatiin betonista F3/022. Tulosten arvioinnista poistettiin yksi betonin F3/022/N muita huomattavasti parempi tulos ja yksi betonin F26/026/SAP/H muita huomattavasti huonompi tulos, koska ne vaikuttivat oleellisesti keskiarvoon ja hajontaan.

Tilastollinen tarkastelu osoittaa, että betonista F26/026/SAP valmistetut palkit olivat todella lujuudeltaan parhaita sekä lämpökäsittlemättöminä että lämpökäsiteltyinä. Palkki F26/026/SAP/H voidaan myös todeta merkittävästi kestävämmäksi kuin lämpökäsittlemätön palkki F26/026/SAP/N. Betonista F26/022 tai F3/022 valmistettujen palkkien keskiarvojen välillä ei puolestaan ollut tilastollisesti merkitsevää eroa lämpökäsittelystä riippumatta.



Kuva 39. Vertailupalkkien B leikkauslujuustulokset [MPa] ja hajonnat.

On mielenkiintoista, että vaikka betonista F3/022/N valmistetussa sarjassa tulokset olivat muuten melko tasaisia, yksi palkki kesti lähes kolme kertaa suuremman kuorman kuin muut sarjan kappaleet. Vastaavasti betonista F26/026/SAP/H valmistetussa sarjassa yksi palkeista leikkautui yli kolme kertaa pienemmällä kuormalla kuin muut palkit. Nämäkin tulokset lienevät osoitus siitä, että betonien käyttö on vielä epävarmaa ja kenties tutkimusmenetelmien ja betonien koostumuksen kehittämällä voitaisiin saada aikaan pysyvästi parempia tuloksia. Muilla vertailupalkkisarjoillakin ero parhaimman ja huonoimman tuloksen välillä oli lähes 600 kN. Hajonta vertailupalkeillakin oli siis suurta koekappaleiden tasavertaisesta käsittelystä ja koestuksesta huolimatta, eli hajontaan on vaikeaa löytää mitään selkeää syytä niiden erilaisten tekijöiden lisäksi, joita aiemmin on pohdittu.

Mikäli tulosten tarkastelusta poistettujen betonien F3/022/N ja F26/026/SAP/H yksittäiset tulokset olisivat olleet tarkastelussa mukana, vertailuparien F3/022/N - F3/022/H, F26/026/SAP/N - F26/026/SAP/H, F26/022/H - F26/026/SAP/H ja F3/022/H - F26/026/SAP/H keskiarvojen erojen tilastollinen merkitsevyys poistuisi.

9.5.5 Palkin 1 kutistumatulosten tarkastelu

Tarkastellaan ensiksi 400 mm Demec-mittarilla saatuja tuloksia. Kutistumamittauksissa oli havaittavissa selvä ero matalampilujuuksisen betonikerroksen sekä erikoislujan betonikerroksen kutistumaominaisuuksien välillä. Luja kerros kutistui kaikilla koekappaleilla huomattavasti enemmän kuin matalampilujuuksinen betonikerros. Erityisesti ero näkyy lämpökäsitellyissä kappaleissa. Lämpökäsittelemättömillä

kappaleilla ero lujan ja normaalibetonikerroksen kutistumien välillä ei ollut niin suuri, mutta kuitenkin selkeä. Yhdessäkään koekappaleessa ei kuitenkaan näkynyt silmin havaittavaa irtoamista tai halkeamia sauman kohdalla.

Kappaleella C+F3/022/N normaalibetonikerroksen kutistuma oli huomattavan suuri (noin 300 $\mu\text{m}/\text{m}$) verrattuna mihinkään muuhun palkkityyppiin. Kappaleen C+F26/026/SAP/N normaalibetonikerroksen kutistuma oli noin 220 $\mu\text{m}/\text{m}$, mikä oli myös suurehko kutistuma muihin verrattuna. Palkeilla M+F26/026/SAP/H oli puolestaan masuunikuonabetonin kutistuma merkittävästi pienempi (vain noin 50 $\mu\text{m}/\text{m}$) kuin muissa palkkityypeissä. Muilla palkeilla normaalilujuuksisen kerroksen kutistuma oli noin 100-150 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Erikoislujan betonikerroksen kutistuma oli suurinta lämpökäsitellyillä palkeilla, joilla tosin kutistuma pysyi lämpökäsittelyn jälkeen pienenä eli käytännössä kutistuminen tapahtui kokonaan ensimmäisen viikon aikana. Lämpökäsittelemättömillä kappaleilla kutistuma oli noin 200-300 $\mu\text{m}/\text{m}$ pienempi kuin lämpökäsitellyillä kappaleilla, ja kutistuma kehittyi tasaisemmin ensimmäisten viikkojen aikana. Kun tarkastellaan kolmen eri erikoislujan betonin koetuloksia, huomataan joitakin eroja. Polymeeribetoni F26/026/SAP kutistui kaikkein vähiten ja betoni F3/022 eniten huolimatta siitä, olivatko kappaleet lämpökäsiteltyjä vai ei. Polymeeribetonin vähäisin kutistuma voi selittyä nimenomaan polymeerin toiminnalla. Erikoislujan betonikerroksen polymeeri on luultavasti imenyt kosteutta normaalilujuuksiselta betonilta betonien rajapinnassa, jolloin lujan kerroksen kutistuma jäi pienemmäksi.

50 mm:n Demec-mittarilla mitattiin kerrosten yhteistä kutistumista niiden välisen sauman yli. Saaduista tuloksista huomataan, että samanlaisillakin hybridipalkeilla oli selkeitä eroja. Jopa saman kappaleen eri mittaustuloksista saadut kutistumatulokset voivat erota huomattavasti toisistaan. Tulosten hajontaan vaikuttaa luultavasti kuitenkin se, että palkit tai edes yhden palkin eri kerrokset eivät olleet kooltaan tai muodoltaan identtisiä. Toisin sanoen kahden eri kerroksen välinen sauma jäi aina epätasaiseksi valuteknisistä syistä, kuten palkkien valmistusmenetelmien yhteydessä on kerrottu. Lisäksi erikoislujan ja normaalilujuuksisen betonin kokonaismäärät koekappaleissa luonnollisesti hieman vaihtelivat, vaikka mahdollisimman tasapaksuihin kerroksiin pyrittiinkin. Näistä syistä nastojenkin väliin saattoi tietysti sattua kohta, jossa toista massaa oli hyvinkin paljon enemmän ja sauma hyvin epätasainen, mikä saattoi myös vaikuttaa kerrosten väliseen kutistumatulokseen.

Joka tapauksessa pääasia on, että vaikka eri kerrosten kutistumaominaisuudet ovat erilaiset ja kerrosten yli mitattu kutistuma vaihteleva, mitään silmin havaittavia halkeamia ei kappaleisiin ilmestynyt. Kun huomioidaan taivutuslujuuskokeidenkin tulokset, voidaan todeta, että tämänsuuruiset erot saman kappaleen eri kerroksien kutistumassa eivät ilmeisesti aiheuta merkittävää sauman irtoilua. Esimerkiksi betoneista F26/026/SAP/N ja F26/026/SAP/H valmistetut palkit osoittautuivat taivutuslujuudeltaan heikoimmiksi, vaikka niiden kerrosten kutistumaominaisuudet olivat lähimpänä toisiaan ja molempien kerrosten kutistuma oli pieni. Kutistuma ei siis muodostune kovinkaan olennaiseksi ongelmaksi hybridirakenteita valmistettaessa.

10 PISTEKUORMAKOKEET

10.1 KOEKAPPALEET JA NIIDEN VALMISTUS

Kokeet tehtiin kolmelle tässä tutkimuksessa käytetylle erikoislujalle betonille sekä vertailun vuoksi normaali- ja masuunikuonabetoneille. Kokeen perusteena ei ollut standardia. Koekappaleiksi valmistettiin laattoja, joiden koko oli $215 \times 215 \times 50 \text{ mm}^3$. Koko määritettiin tätä koetta ja käytössä olevia koestuslaitteita varten sopivaksi. Erikoislujista betoneista tehtiin sekä lämpökäsitelty että lämpökäsittämättömät koekappaleet, ja vertailubetoneista eli normaali- ja masuunikuonabetoneista lämpökäsiteltiin kaikki masuunikuonabetonilaatat. Koesarjan koko oli kuusi laattaa kutakin betonia kohden, kuten hybridirakennekokeissakin.

Laatat valettiin tätä koetta varten valmistettuihin öljytyihin vanerimuotteihin. Muotit täytettiin samalla täryttäen. Lisäksi joka valun yhteydessä valmistettiin kolme puristuslujuuskuutiota 28 vuorokauden koestusta varten sekä suoritettiin samat tuoreen betonin kokeet kuin tutkimuksen muissakin vaiheissa. Laattoja ja puristuslujuuskuutioita säilytettiin samalla tavalla kuin hybridikoekappaleita eli ensin viikon ajan kosteus-säilytysuoneessa ja sen jälkeen koestukseen eli 28 vuorokauden ikään saakka 65 % suhteellisessa kosteudessa.

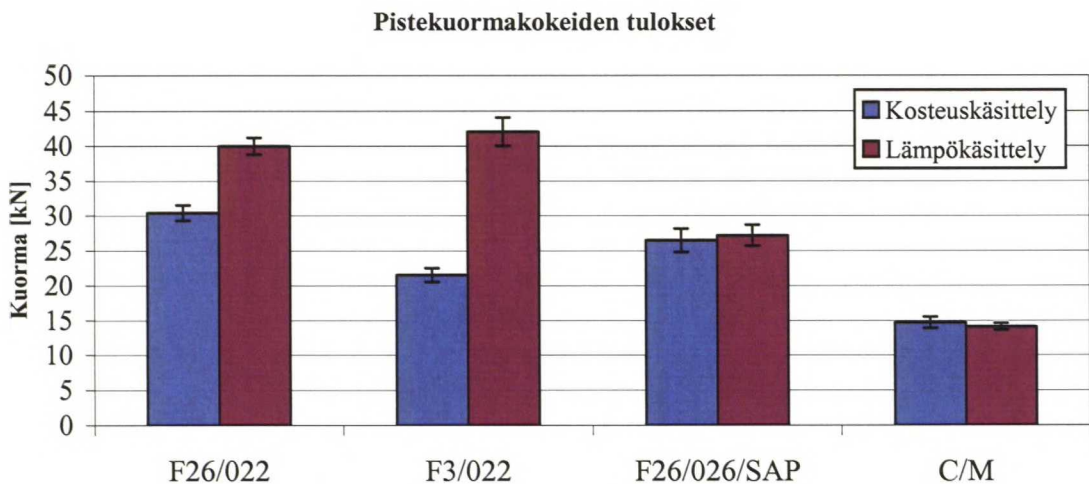
10.2 PISTEKUORMAKOKEIDEN SUORITTAMINEN

Alun perin tarkoituksena oli tehdä laatoille lävistyslujuuskokeet. Ensimmäisten koekappaleiden koestuksessa kuitenkin havaittiin, että varsinaista lävistystä ei saada

tämänkokoisilla ja raudoittamattomilla koekappaleilla aikaan. Laatan paksuus oli liian suuri suhteessa sen pinta-alaan, joten laatta hajosi kahteen tai kolmeen osaan jo alle 30 kN:n kuormilla eikä lävistystä tapahtunut. Koemenettelyyn kuitenkin tyydyttiin, ja koetuloksista arvioidaan materiaalin pistekuormankestävyyttä verrattuna normaali-lujuuksiseen betoniin.

Kokeet tehtiin Rakennus- ja ympäristötekniikan koehallin Toni Technic -nimisellä yleisaineenkoestuslaitteella. Laatan alle asetettiin ulkohalkaisijaltaan 215 mm ja sisähalkaisijaltaan 165 mm oleva teräsrenkas, ja laatan päälle kuormittajaksi halkaisijaltaan 50 mm teräksinen sylinteri. Laatan ja molempien teräsosien väliin laitettiin kumit tasoittamaan mahdollisia epätasaisuuksia. Kuormitusnopeus oli 0,5 mm/min.

10.3 PISTEKUORMAKOKEIDEN TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU



Kuva 40. Laattojen pistekuormankestävyys.

Laatan lävistys ei onnistunut käytetyllä koemenettelyllä, joten tuloksista päädyttiin arvioimaan erikoislujan betonin pistekuorman kestävyyttä. Tulosten perusteella voidaankin päätellä, että erikoisluja rakenne on hyvin herkkä pistekuormalle. Koekappale hajoaa, kun alapinnan vetolujuus ei enää riitä.

Pistekuormaa kestivät odotusten mukaisesti parhaiten erikoislujien betonien lämpökäsitellyt kappaleet. Parhaimman lujuuden, noin 40 MPa, saavuttivat betonit F26/022/H ja F3/022/H. Betonin F26/026/SAP lämpökäsitellyt ja lämpökäsittelemättömät kappaleet eivät eronneet lujuudessa kovinkaan paljon toisistaan, ja

muihin betoneihin verrattuina ne olivat samaa suuruusluokkaa kuin F26/022/N ja F3/022/N. Normaali- ja masuunikuonabetonien pistekuorman kestävyys oli noin 14 MPa, mikä oli karkeasti määritellen noin puolet lujuudesta, jonka betoni F26/026/SAP ja betonit F26/022/N ja F3/022/N saavuttivat. Kahden viimeksi mainitun betonin lämpökäsitellyt kappaleet olivat puolestaan noin kolme kertaa niin lujia kuin tavanomaiset betonit. Ero erikoislujien betonien ja tavanomaisten betonien lujuuksien välillä oli siis samaa luokkaa kuin taivutuslujuuskokeissa vertailupalkeilla A. Tilastollisen tarkastelun tulokset ovat taulukossa 20.

Taulukko 20. T-testillä suoritettu leikkauslujuustulosten tilastollinen tarkastelu. Tummennetut p-arvot kuvaavat tilastollisesti merkitsevää ($p\text{-arvo} < 0,05$) eroa vertailuparin keskiarvoissa.

Vertailupari	p-arvo	Vertailupari	p-arvo	Vertailupari	p-arvo
F26/022/N - F26/022/H	0,00	F26/022/N - F3/022/N	0,00	F26/022/H - F3/022/H	0,31
F3/022/N - F3/022/H	0,00	F26/022/N - F26/026/SAP/N	0,04	F26/022/H - F26/026/SAP/H	0,00
F26/026/SAP/N - F26/026/SAP/H	0,70	F3/022/N - F26/026/SAP/N	0,01	F3/022/H - F26/026/SAP/H	0,00

T-testillä suoritettu tilastollinen tarkastelu tukee kuvaajasta tehtyjä havaintoja. Betonin F26/026/SAP lämpökäsiteltyjen ja -käsittelemättömien kappaleiden lujuuksien keskiarvoissa ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa, eikä myöskään lämpökäsiteltyjen betonien F26/022/H ja F3/022/H välillä. Kaikkien muiden vertailuparien lujuuksien keskiarvoilla on tilastollisesti merkitsevää eroa. Pistekuormakokeiden tulokset ovat liitteenä 16.

11 YHTEENVETO

Erikoislujan betonin kehityksessä ja tutkimuksessa on edetty jo vaiheeseen, jossa materiaalin perusominaisuudet alkavat olla tunnettuja ja tutkimusta voidaan viedä paremmalta pohjalta eteenpäin. Esimerkiksi erikoislujan betonimassan jäykkyys ja työstettävyyden hankaluus oli aiemmin ongelmana erikoislujan betonin valmistuksessa, mutta nyt betonin koostumusta on onnistuttu muokkaamaan jo huomattavasti paremmaksi. Tähän on vaikuttanut oleellisesti tehonotkistimien kehitys. Tällä hetkellä erikoislujasta betonista tehdään jopa itsetiivistyvää, mikä luo yhä uusia käyttömahdollisuuksia ja luonnollisesti lisää erikoislujan betonin käytettävyyttä

hankalissakin rakenteissa. Käyttökohteissa on kuitenkin huomioitava se, että erikoislujan massan työstettävyys on erinomainen mutta työstettävyysaika huomattavasti lyhyempi kuin tavanomaisella betonilla.

Lisäksi epävarmuutta erikoislujien betonien valmistukseen tuo vielä se, miten herkästi tämänkin tutkimuksen betonien työstettävyysominaisuudet vaihtelivat käytössä olevan materiaalierän mukaan. Toki käytännön kannalta olisi tavoiteltavaa löytää esimerkiksi vain yksi kussakin betonissa parhaiten toimiva notkistin, jota käytettäessä teollisuudessakin voitaisiin luottaa siihen, että valmistettavan betonin ominaisuudet eivät muutu vaikkapa uuden sementtierän myötä.

Rakentamisessa on huomioitava myös erikoislujan betonin kutistuma- ja virumaominaisuudet, jotka ovat normaalibetoniin verrattuna hankalammat suuren autogeenisen kutistuman takia. Autogeenista kutistumaa rajoittavan polymeerin käyttö ei tässä tutkimuksessa tuonut havaittavaa parannusta betonin kutistumaan. Sen sijaan vaikutus puristuslujuuteen oli negatiivinen: polymeerin lisäys heikensi betonin puristuslujuutta selvästi. Lämpökäsittelyn vaikutus erikoislujan betonin ominaisuuksiin oli huomattava. Puristuslujuudessa saavutetaan aivan eri taso lämpökäsittelyn ansiosta, ja myös viruminen on vähäisempää.

Hybridirakenteiden tuloksia tarkasteltaessa käsiteltiin muutamia palkkien valmistukseen ja koestukseen liittyviä asioita, jotka saattoivat vaikuttaa suurehkoon hajontaan tuloksissa. Voisi ajatella, että työskentelytarkkuutta voisi kehittää ja parantaa, jotta tutkimusaineistosta saadaan mahdollisimman tasainen ja virheetön. Tässä vaiheessa tutkimusta suurehko hajonta on kuitenkin vain hyväksyttävä yhdistettäessä kahta erilaista materiaalia. Tässä hybridirakennetutkimuksessa tärkeintä oli tietää, toimivatko hybridirakenteet alkuunkaan ja millaisia lujusominaisuuksia niiltä on realistista odottaa. Toki on huomioitava myös tekijät, jotka saattavat heikentää tai parantaa hybridirakenteen kestävyyttä. Sekä hybridirakenteiden laboratorio-olosuhteissa tapahtuvassa tutkimuksessa että niiden käytännön teollisessa valmistuksessa on varmasti vielä paljon tutkittavaa ja kehitettävää, jotta parhaaseen mahdolliseen tulokseen päästään.

Palkeilla 1 ja 3 kalvon muodostuminen erikoislujan betonin pinnalle mahdollisesti vaikutti kerrosten väliseen tartuntaan, mutta sitä ei tässä työssä tutkittu sen tarkemmin. Voisi olettaa, että kalvo heikentää tartuntaa ja siten saumakohdan lujuutta. Toisaalta

ilman valutaukoa olisi saatu aikaan aivan erilaisia rakenteita, sillä massat olisivat sekoittuneet saumakohdassaan täysin. Tällöin esimerkiksi palkissa 3 olisi toinen saumakohta ollut selkeä kahden eri betonin raja ja toinen taas sekoitus kahta eri massaa. Joka tapauksessa tämän tutkimuksen tuloksia voidaan pitää positiivisina, sillä kaikilla hybridipalkeilla saavutettiin vähintään normaalibetonista valmistettujen vertailupalkkien lujuuksia vastaavia taivutus- ja leikkauslujuustuloksia tai jopa erikoislujasta betonista valmistettujen palkkien lujuuksien kaltaisia tuloksia.

Polymeerin toiminta ei kutistuma- ja virumakokeissa ollut hyödyllistä, mutta sen sijaan sen mahdollista vaikutusta hybridirakenteissa ei pidä unohtaa. Palkeilla 2 ja 3 oli havaittavissa parempia lujuusominaisuuksia, kun lujassa betonissa oli mukana polymeeriä. Lujan ja tavanomaisen betonin saumakohdassa voi tällöin tapahtua niin, että polymeeri imee kosteutta tavanomaisesta betonista, jolloin saumakohdan kutistuma vähenee ja liitoksesta tulee lujempi. Tätä ilmiötä olisi mielenkiintoista selvittää enemmän.

Tämän tutkimuksen perusteella hybridirakenteiden jatkotutkimukseen on aihetta, ja kun ajatellaan käytännön rakentamisen pyrkimyksiä taloudellisuuteen, käytännöllisyyteen ja esteettisyyteen, on erittäin perusteltua jatkaa tutkimusta tällä saralla. Toimivilla hybridirakenteilla eli erikoislujan betonin käytöllä tietyissä kohdissa suurempaa rakennetta voidaan saavuttaa parempaa lujuutta ja kestävyyttä koko rakenteelle sekä säästää rahaa ja välttää massiivisia rakenteita. Tässä tutkimuksessa hybridirakenteista saatiin positiivisia tuloksia eikä ilmennyt merkkejä siitä, etteivätkö hybridirakenteet olisi luotettavia ja kehittämisen arvoisia.

KIRJALLISUUSVIITTEET

Achieving the promise of ultra-high-performance concrete, Focus, November 2004, <http://www.tfhr.gov/focus/nov04/01.htm>

Aïtcin, P-C., 1998, High performance concrete, London, E&FN SPON, 563 s.

Alexander, K.M., Wardlaw, J., 1959, A possible mechanism for carbonation shrinkage and crazing based on the studies of thin layers of hydrated cement, Australian Journal of Applied Sciences, Vol. 10, No. 4, s. 470-483

Andrade, C., Alonso, C., 2004, Durability of ultrahigh performance concrete against high temperatures and leaching by running water, Proceedings of International Conference on Durability of HPC and Final Workshop of CONLIFE, Essen, Germany, s.37-50

Betonitekniiikan oppikirja 2004, By 201, Suomen betoniyhdistys, 570 s.

CEB Manual, Cracking and Deformations, 1985, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse

Cheyrezy, M., Maret, V., Frouin, L., 1995, Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete), Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, s. 1491-1500

Combating shrinkage with internal curing - a research report, 2005, PCA Research & Technology PCA R&D SN2620, http://www.cement.org/tech/cct_research_shrinkage.asp

Cwirzen, A., 2004, Effects of the transition zone and ageing on the frost damage of high strength concretes, Teknillinen korkeakoulu, Rakennusmateriaalitekniikka, Julkaisu 17, Espoo

Cwirzen, A., Penttala V., 2005, RPC mix optimization by determination of the minimum water requirement of binary and polydisperse mixtures, Proceedings of ISISS 2005 Conference, Nanjing, China

Cwirzen, A., Penttala, V., 2006, Ultra-High-Performace Concrete, Teknillinen korkeakoulu, Rakennusmateriaalitekniikka, julkaisu 19, julkaisematon, Espoo

Dauriac, C., 1997, Special concrete may give steel stiff competition, Building with concrete, The Seattle Daily Journal of Commerce, May 9, <http://www.djc.com/special/concrete97/10024304.htm>

Dilger, W. H., Wang, C., Niitani, K., 1996, Experimental study on shrinkage and creep of high-performance concrete, Proceedings of Fourth International Symposium on the Utilization of High Strength / High Performance Concrete, Paris, France, s. 311-319

Donnaes, P., 1998, Powder concrete strengthens structural design, http://concreteproducts.com/mag/concrete_powder_concrete_strengthens/index.html

Emerging construction technologies, 2006, Reactive Powder Concrete, <http://www.new-technologies.org/ECT/Civil/reactive.htm>

Finnsementti Oy, 2006, SR-sementin tuote-esite, <http://www.finnsementti.fi>

Gowripalan, N., Watters, R., Jamal, S. Q., 2005, Very High Strength Fibre Reinforced Concrete for Bridge Super-Structures and Blast Resistant Structures, International conference on Construction Materials, ConMat'05, Vancouver, Canada

Harris, D.K., Roberts-Wollmann, C.L., 2005, Characterization of the punching shear capacity of thin ultra-high performance concrete slabs, Virginia Polytechnic Institute & State University, Report No. VTRC 05-CR26, Virginia, http://www.viriniadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/05-cr26.pdf

Holt, E., 2001, Early age autogenous shrinkage of concrete, Doctoral Dissertation, University of Washington, Seattle

Jesser, L., 1927, Kolloidichemische Austrocknungsreaktionen der Portlandcementmortel, Berg- und Hüttenmannisches Jahrbuch der Montznistischen Hochschule in Leoben, V. 75, s. 69-81

Kamimura, K., Sereda, P.J., Swenson, E.G., 1965, Changes in weight and dimensions in the drying and carbonation of Portland cement mortars, Magazine of Concrete Research, Vol. 17, No. 50, s. 5-14

Laininen, P., 1998, Todennäköisyys ja sen tilastollinen soveltaminen, 5. painos, Yliopistokustannus/Otatieto, Helsinki 309 s.

Lynam, C.G., 1934, Growth and movement in Portland cement concrete, Oxford University Press, London, s. 36-27

Ma, J., Schneider, H., 2002a, Properties of Ultra-High-Performance Concrete, Lacer, No.7, http://aspdin.wifa.uni-leipzig.de/institut/lacer/lacer07/l07_05.pdf

Ma, J., Dietz, J., 2002b, Ultra High Performance Self Compacting Concrete, Lacer, No. 7, http://aspdin.wifa.uni-leipzig.de/institut/lacer/lacer07/l07_06.pdf

Ma, J., Orgass, M., 2005, Creep of Ultra High Performance Concrete, Lacer, No. 10, http://aspdin.wifa.uni-leipzig.de/institut/lacer/lacer10/l10_32.pdf

Mannonen, P., Penttala, V., Al-Neshawy, F., Räsänen, V., 2004, Itsetiivistyvien betonien suhteitus, valmistustekniikka ja perusominaisuudet, Teknillinen korkeakoulu, Rakennusmateriaalitekniikka, Julkaisu 16, Espoo

Neville, A. M, 1995, Properties of Concrete, Fourth Edition, Pearson Education Limited, England, 844 s.

Penttala V., Ipatti A., 1986, Masuunisementistä ja yleissementistä valmistettujen betonien kutistuminen, Osa III Estetty kutistuminen ja hydrataatiokutistuminen, Teknillinen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos, Julkaisu 85, Espoo

Penttala V., Rautanen T., 1990, Microporosity, Creep and Shrinkage of High-Strength Concretes, High-Strength Concrete, Second International Symposium, ACI SP 121-21, s. 408-432

Perry, V. H., Zakariasen, D., First Use of Ultra-High Performance Concrete for an Innovative Train Station Canopy, 2004, Portland Cement Association, Concrete Technology Today, Vol. 25, No. 2, http://www.cement.org/pdf_files/CT042.pdf

Persson, B., 1998, Quasi-instantaneous and Long-term Deformations of High-Performance Concrete with Some Related Properties, Lund University, Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, 411 s.

Ramachandran, V.S., Feldman, R.F., Beaudoin, J.J., 1981, Concrete Science, Heyden & Son Ltd, London

Resplendino, J., 2004, First Recommendations for Ultra-High-Performance Concretes and examples of application, Ultra High Performance Concrete (UHPC), Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, September 13-15, 2004, Kassel University Press, Heft 3, s. 79-90

SFS-käsikirja 156, Betonin testaus, 2002, Suomen Standardisoimisliitto, paino Kyrrii Oy, Helsinki, 177 s.

Tazawa, E., Miyazawa, S., 1996, Influence of autogenous shrinkage on cracking in high-strength concrete, Proceedings of Fourth International Symposium on the Utilization of High Strength / High Performance Concrete, Paris, France, s.321-330

Tulimaa, M., 2005, Erikoislujat betonit, Betoni-lehti 4/2005

Zanni, H., Cheyrezy, M., Maret, V., Philippot, S., Nieto, P., 1996, Investigation of hydration and pozzolanic reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) using Si NMR, Cement and Concrete Research, Vol. 26, No.1, s. 93-100

LIITTEET

- Liite 1** Tuoreen betonin kokeiden tulokset
- Liite 2** Puristuslujuuskokeiden tulokset ja koekuutioiden tiheydet
- Liite 3** Lieriöiden puristuslujuuskokeiden tulokset virumakoetta varten
- Liite 4** Betonin F26/022/N kutistuma- ja virumakokeiden tulokset
- Liite 5** Betonin F26/022/H kutistuma- ja virumakokeiden tulokset
- Liite 6** Betonin F3/022/N kutistuma- ja virumakokeiden tulokset
- Liite 7** Betonin F3/022/H kutistuma- ja virumakokeiden tulokset
- Liite 8** Betonin F26/026/SAP/N kutistuma- ja virumakokeiden tulokset
- Liite 9** Betonin F26/026/SAP/H kutistuma- ja virumakokeiden tulokset
- Liite 10** Kutistumakoekappaleiden painojen muutokset
- Liite 11** Virumakoetelineiden painojen muutokset
- Liite 12** Hybridirakennekokeiden tulokset
- Liitteet 13-15** Hybridipalkkien kutistumatulokset
- Liite 16** Laattojen pistekuormakokeiden tulokset

	Sekoitus- aika [min:s]	Lämpö- tila [C]	Ilma- määrä [%]	T50- aika [s]	Leviämä [cm]	Mini- kartiokoe [cm]
F26/022						
Kutistuma- ja virumakokeiden betoni	10:30	-	5	5,0	77,0	>30
Hybridirakennekokeiden betoni	10:20	31,5	5,2	4,7	83,5	>30
	10:20	30,8	3,2	6,3	89,0	>30
	10:30	-	5,0	6,3	75,0	>30
	10:30	30,3	4,2	8,8	76,5	>30
	10:40	30,6	4,3	10,0	76,5	>30
	9:60	29,5	5,1	7,9	76,0	>30
	10:30	31,2	4,6	4,8	79,5	30
	10:40	28,6	3,6	6,4	81,5	>30
Pistekuormakokeiden betoni	10:40	30,3	5	14,4	63,5	20,5
	10:05	30,3	5,8	12,25	64,5	22,5
F3/022						
Kutistuma- ja virumakokeiden betoni	9:60	-	4,4	3,0	83,0	>30
Hybridirakennekokeiden betoni	10:20	30,4	3,4	4,2	77,0	30
	10:20	28,9	4,2	8,3	78,0	>30
	11:20	28,7	4,4	5,7	82,5	>30
	10:20	26,7	4,2	7,3	70,5	>30
	10:10	29,6	4,4	8,7	76,5	30
	10:10	29,1	4,0	5,3	80,0	>30
	10:20	27,8	3,6	6,5	78,5	>30
	10:10	28,2	4,6	5,7	82,0	>30
Pistekuormakokeiden betoni	10:10	30,3	6,5	7,9	69,5	23
	9:50	28,6	5,2	8,5	70	30
F26/026/SAP						
Kutistuma- ja virumakokeiden betoni	10:00	-	4,4	3,7	93,0	>30
Hybridirakennekokeiden betoni	11:10	31,2	4,3	4,5	86,5	>30
	11:20	29,3	3,2	3,4	91,0	>30
	11:20	28,8	3,9	3,9	87,0	>30
	11:20	28,3	4,5	6,2	88,0	>30
	11:20	29,9	3,6	3,4	87,5	>30
	11:30	29,1	3,4	4,2	88,5	>30
	11:30	28,6	3,4	5,5	91,0	>30
	11:20	29,0	3,7	5,4	83,0	>30
Pistekuormakokeiden betoni	10:40	29,1	5,8	7,88	74	>30
	10:50	31,1	5,8	7,37	74	>30

	Lämpötila [C]	Ilmamäärä [%]	Painuma [cm]	Vebe [s]
C				
Hybridirakennekokeiden betoni	28,3	2,7	1,5	3,3
	27,2	3	4	2,1
	25,9	2,7	3,5	2,0
	25,9	2,9	3	3,2
	25,9	3,6	3	1,8
	25,2	3,7	5	1,9
	24,1	3,2	4,5	2,0
	24,3	2,7	5	1,6
Pistekuormakokeiden betoni	26,5	2,4	2	3,0
M				
Hybridirakennekokeiden betoni	23,9	2,2	12	1,2
	24,6	2,2	8,5	1,9
	25,3	3,1	3	-
	24,1	2,3	3	1,6
	24,9	2,7	5	1,4
	23,8	2,4	4,8	1,6
	23,2	2,5	3,5	1,9
	24,6	2,7	3	2,3
Pistekuormakokeiden betoni	24,2	2,9	4	2,0

Hybridirakennekoebetoneista valmistetut kuutiot										
	Puristuslujuus [N/mm2]					Tiheys [kg/dm3]				
	1	2	3	ka	kh	1	2	3	ka	kh
F26/022/N	153,4	147,3	152,6	151,1	3,32	2,302	2,285	2,262	2,283	0,02
F26/022/N	151,2	140,4	151,5	147,7	6,32	2,284	2,272	2,278	2,278	0,01
F26/022/N	149,4	154,8	151,5	151,9	2,72	2,336	2,325	2,335	2,332	0,01
F26/022/H	185,5	185,7	182,6	184,6	1,73	2,292	2,291	2,290	2,291	0,00
F26/022/H	182,5	188,8	181,9	184,4	3,82	2,277	2,283	2,265	2,275	0,01
F26/022/H	195,2	197,3	188,8	193,8	4,43	2,330	2,317	2,303	2,317	0,01
F3/022/N	147,8	139,7	140,5	142,7	4,46	2,297	2,282	2,272	2,284	0,01
F3/022/N	143,1	151,0	150,8	148,3	4,50	2,341	2,324	2,333	2,333	0,01
F3/022/N	130,4	125,5	128,1	128,0	2,45	2,276	2,307	2,287	2,290	0,02
F3/022/H	159,7	170,0	176,0	168,6	8,24	2,273	2,287	2,286	2,282	0,01
F3/022/H	188,9	182,3	172,3	181,2	8,36	2,319	2,328	2,318	2,322	0,01
F3/022/H	170,8	167,4	152,5	163,6	9,73	2,271	2,279	2,300	2,283	0,01
F26/026/SAP/N	156,2	154,1	153,1	154,5	1,58	2,223	2,242	2,213	2,226	0,01
F26/026/SAP/N	164,5	157,7	160,5	160,9	3,42	2,271	2,235	2,263	2,256	0,02
F26/026/SAP/N	163,7	158,0	142,7	154,8	10,86	2,275	2,228	2,273	2,259	0,03
F26/026/SAP/H	181,8	184,6	177,7	181,4	3,47	2,249	2,266	2,276	2,264	0,01
F26/026/SAP/H	182,6	186,6	178,6	182,6	4,00	2,229	2,282	2,273	2,261	0,03
F26/026/SAP/H	180,3	184,3	179,3	181,3	2,65	2,262	2,278	2,285	2,275	0,01
C	41,7	39,7	42,0	41,1	1,25	2,324	2,334	2,334	2,331	0,01
C	43,9	42,4	44,3	43,5	1,00	2,292	2,300	2,292	2,295	0,00
C	40,7	41,5	42,2	41,5	0,75	2,293	2,290	2,320	2,301	0,02
C	41,9	42,6	41,6	42,0	0,51	2,332	2,309	2,305	2,315	0,01
C	38,3	40,5	39,7	39,5	1,11	2,314	2,306	2,282	2,301	0,02
C	39,3	40,8	40,2	40,1	0,75	2,272	2,303	2,284	2,286	0,02
C	42,8	39,6	42,1	41,5	1,68	-	-	-	-	-
C	43,3	36,9	42,8	41,0	3,56	2,303	2,267	2,329	2,300	0,03
M	33,1	32,8	32,8	32,9	0,17	2,335	2,329	2,288	2,317	0,03
M	35,5	34,1	35,9	35,2	0,95	2,302	2,316	2,284	2,301	0,02
M	36,1	38,4	38,9	37,8	1,49	2,325	2,330	2,338	2,331	0,01
M	37,5	38,1	38,6	38,1	0,55	2,325	2,334	2,342	2,334	0,01
M	39,7	35,8	37,2	37,6	1,98	2,326	2,351	-	2,339	0,02
M	39,4	42,0	40,9	40,8	1,31	2,339	2,352	2,319	2,337	0,02
M	39,8	40,0	40,5	40,1	0,36	2,346	2,361	2,353	2,353	0,01
M	36,9	37,7	36,8	37,1	0,49	2,332	2,339	2,298	2,323	0,02

Pistekuormakoebetoneista valmistetut kuutiot										
	Puristuslujuus [N/mm2]					Tiheys [kg/dm3]				
	1	2	3	ka	kh	1	2	3	ka	kh
F26/022/N	148,3	143,2	148,0	146,5	2,86	2,305	2,305	2,277	2,296	0,02
F26/022/H	178,4	161,8	189,7	176,6	14,03	2,294	2,29	2,278	2,287	0,01
F3/022/N	137,1	132,7	128,1	132,6	4,50	2,289	2,277	2,256	2,274	0,02
F3/022/H	168,4	177,6	160,5	168,8	8,56	2,275	2,289	2,252	2,272	0,02
F26/026/SAP/N	148,2	150,2	153,2	150,5	2,52	2,230	2,238	2,250	2,239	0,01
F26/026/SAP/H	166,0	147,9	168,2	160,7	11,14	2,228	2,224	2,222	2,225	0,00
C	41,3	38,5	41,4	40,4	1,65	2,314	2,270	2,339	2,308	0,03
M	35,2	36,7	35,9	35,9	0,75	2,347	2,321	2,316	2,330	0,02

Ka = keskiarvo, kh = keskihajonta

Kutistuma- ja virumakoebetoneista valmistetut kuutiot										
	Puristuslujuus [N/mm2]					Tiheys [kg/dm3]				
	1	2	3	ka	kh	1	2	3	ka	kh
F26/022/N										
1 d	70,4	70,3	68,0	69,6	1,36	2,306	2,286	2,276	2,289	0,02
7 d	120,8	126,9	125,3	124,3	3,16	2,306	2,333	2,317	2,319	0,01
28 d	136,1	143,6	144,3	141,3	4,55	2,296	2,289	2,286	2,290	0,01
F26/022/H										
1 d	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7 d	199,7	198,1	196,8	198,2	1,45	2,332	2,315	2,304	2,317	0,01
28 d	188,8	195,5	204,6	196,3	7,93	2,203	2,295	2,277	2,258	0,05
F3/022/N										
1 d	52,2	48,8	46,9	49,3	2,69	2,309	2,290	2,262	2,287	0,02
7 d	114,4	108,9	113,3	112,2	2,91	2,327	2,333	2,313	2,324	0,01
28 d	139,5	142,3	141,6	141,1	1,46	2,316	2,318	2,341	2,325	0,01
F3/022/H										
1 d	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7 d	188,3	169,0	182,9	180,1	9,96	2,312	2,323	2,324	2,320	0,01
28 d	181,8	185,8	184,9	184,2	2,10	2,277	2,325	2,307	2,303	0,02
F26/026/SAP/N										
1 d	41,2	41,2	41,6	41,3	0,23	2,260	2,253	2,218	2,244	0,02
7 d	111,8	104,9	110,8	109,2	3,73	2,250	2,264	2,271	2,262	0,01
28 d	146,5	147,2	144,1	145,9	1,63	2,250	2,249	2,250	2,250	0,00
F26/026/SAP/H										
1 d	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7 d	164,4	154,6	174,6	164,5	10,00	2,269	2,252	2,256	2,259	0,01
28 d	166,4	183,8	175,8	175,3	8,71	2,213	2,239	2,236	2,229	0,01

Ka = keskiarvo, kh = keskihajonta

Virumakoelieriöiden puristuslujuuskokeiden tulokset

		1	2	3	Keskiarvo	Virumakokeen kuorma [kN]
kN	F26/022/H	359	305	365	343	120
N/mm2		183	155	186	175	
kN	F26/022/N	231	234	228	231	76
N/mm2		118	119	116	118	
kN	F3/022/H	320	312	351	328	110
N/mm2		163	159	179	167	
kN	F3/022/N	220	203	205	209	70
N/mm2		112	104	105	107	
kN	F26/026/SAP/H	308	297	296	300	100
N/mm2		157	151	151	153	
kN	F26/026/SAP/N	202	200	207	203	68
N/mm2		103	102	106	104	

F26/022/N Kutistumakokeiden tulokset

65% RH	Paino [g]			Kutistuma									Aika	Keskiarvo			
7.6.2005	Kpl 19	Kpl 20	Kpl 21	Kpl 19			Kpl 20			Kpl 21			[d]	Kpl 19	Kpl 20	Kpl 21	Kaik ki
8.6.2005	926,8	940,1	925,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
9.6.2005	930,4	944,3	930,1	60	-40	40	0	20	101	0	101	60	2	20	40	54	38
10.6.2005	930,2	944,0	929,5	141	60	121	60	20	161	101	261	141	3	107	80	167	118
11.6.2005	931,2	944,9	930,5	121	121	121	60	80	60	80	-60	101	4	121	67	40	76
12.6.2005	931,8	945,8	930,9	181	60	141	121	60	221	121	-201	80	5	127	134	0	87
13.6.2005	931,6	945,6	930,6	161	121	161	101	60	201	121	-302	80	6	147	121	-34	78
14.6.2005	920,1	929,8	919,7	241	121	201	101	141	181	201	-221	221	7	188	141	67	132
15.6.2005	919	928	918	302	241	241	241	241	301	241	-261	241	8	261	261	74	199
16.6.2005	919	927	918	382	322	322	302	301	422	281	-221	342	9	342	342	134	272
17.6.2005	919	929	919	442	342	362	342	322	422	382	-121	382	10	382	362	214	319
18.6.2005	919	929	919	462	362	382	382	402	462	402	-80	402	11	402	415	241	353
20.6.2005	919	929	919	422	322	342	382	382	462	362	-60	382	13	362	409	228	333
21.6.2005	919	927	918	543	382	422	402	462	462	462	-141	442	14	449	442	255	382
22.6.2005	919	927	918	523	382	442	422	462	462	442	-141	462	15	449	449	255	384
23.6.2005	919	927	918	543	402	462	422	482	482	442	-121	482	16	469	462	268	400
24.6.2005	919	927	918	543	402	422	442	462	482	402	-80	482	17	456	462	268	395
27.6.2005	918	927	918	442	382	322	382	342	422	382	-141	462	20	382	382	234	333
29.6.2005	918	927	918	563	402	462	422	462	482	442	-101	462	22	476	456	268	400
1.7.2005	918	927	918	563	402	442	442	442	462	442	-101	482	24	469	449	275	398
5.7.2005	918	927	917	523	422	422	422	482	462	442	-80	503	28	456	456	288	400
8.7.2005	918	927	917	543	402	422	422	482	442	422	-80	462	31	456	449	268	391
15.7.2005	918	927	918	563	362	442	422	462	462	402	-40	462	38	456	449	275	393
21.7.2005	918	927	918	503	422	482	422	523	442	503	-40	523	44	469	462	328	420
29.7.2005	918	927	918	583	422	503	482	482	482	462	-60	543	52	503	482	315	433
8.8.2005	918	927	917	563	362	462	422	442	482	503	-121	543	62	462	449	308	406
15.8.2005				563	382	482	462	482	482	503	-40	543	69	476	476	335	429
23.8.2005				503	382	462	462	462	462	442	-60	523	77	449	462	301	404
30.8.2005	918	926	917	583	422	482	482	503	462	482	-101	503	84	496	482	295	424
6.9.2005				523	402	462	462	482	482	442	-80	523	91	462	476	295	411
14.9.2005				543	422	462	462	482	482	442	-101	503	99	476	476	281	411
27.9.2005	916	925	916	563	422	482	462	482	523	442	-101	543	112	489	489	295	424
17.10.2005				583	442	442	462	462	563	503	-101	523	132	489	496	308	431
18.11.2005	916	925	917	623	462	543	563	543	603	482	-101	563	164	543	570	315	476
9.2.2006				704	482	563	603	583	623	543	-20	583	247	583	603	369	518
13.4.2006				724	543	563	603	623	663	503	20	603	310	610	630	375	538
14.6.2006	915	925	915	764	563	583	643	683	643	643	121	683	372	637	657	482	592

85% RH	Paino [g]			Kutistuma									Aika	Keskiarvo			
7.6.2005	Kpl 22	Kpl 23	Kpl 24	Kpl 22			Kpl 23			Kpl 24			[d]	Kpl 22	Kpl 23	Kpl 24	Kaikki
8.6.2005	940,7	937,1	932,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
9.6.2005	944,6	940,7	935,7	0	-20	80	0	40	101	-101	20	-40	2	20	47	-40	9
10.6.2005	944,4	940,6	935,6	161	60	241	121	221	241	0	221	121	3	154	194	114	154
11.6.2005	935,0	929,9	922,0	141	60	241	0	141	121	20	121	40	4	147	87	60	98
12.6.2005	935,3	930,6	922,8	80	101	322	121	221	261	40	141	80	5	168	201	87	152
13.6.2005	935,3	930,3	922,4	121	20	261	60	161	221	101	141	141	6	134	147	127	136
14.6.2005	935,6	930,4	922,5	201	141	342	181	281	302	101	221	201	7	228	255	174	219
15.6.2005	936	929	922	221	141	362	201	322	302	121	241	-121	8	241	275	80	199
16.6.2005	936	930	923	261	221	101	281	362	322	141	261	281	9	194	322	228	248
17.6.2005	934	929	922	241	241	101	281	342	281	141	322	302	10	194	302	255	250
18.6.2005	934	929	922	281	241	121	322	402	302	201	362	342	11	214	342	302	286
20.6.2005	934	929	922	362	281	101	322	422	422	221	362	322	13	248	389	302	313
21.6.2005	936	931	923	382	322	101	362	442	402	241	402	362	14	268	402	335	335
22.6.2005	936	931	923	342	281	80	302	422	422	241	382	382	15	235	382	335	317
23.6.2005	934	930	922	362	301	121	362	462	482	281	422	402	16	261	436	369	355
24.6.2005	934	930	922	382	342	121	382	462	462	261	402	382	17	281	436	348	355
27.6.2005	935	929	920	422	322	80	342	462	442	281	382	402	20	275	415	355	348
29.6.2005	935	930	922	301	322	0	342	382	442	261	402	382	22	208	389	348	315
1.7.2005	935	930	922	382	322	80	382	462	442	281	382	342	24	261	429	335	342
5.7.2005	935	930	923	342	362	80	382	462	462	241	342	342	28	261	436	308	335
8.7.2005	935	930	923	322	281	20	322	422	402	201	281	342	31	208	382	275	288
15.7.2005	935	930	922	301	342	20	342	442	422	241	382	382	38	221	402	335	319
21.7.2005	935	930	922	322	261	60	281	402	462	261	382	302	44	214	382	315	304
29.7.2005	935	930	922	342	322	60	402	442	503	301	402	382	52	241	449	362	351
9.8.2005	935	930	922	322	322	40	382	442	462	261	382	382	63	228	429	342	333
16.8.2005				281	301	40	382	402	422	241	362	362	70	208	402	322	310
24.8.2005				322	301	40	382	442	422	281	362	342	78	221	415	328	322
31.8.2005	935	930	922	301	322	20	362	402	402	241	342	342	85	214	389	308	304
7.9.2005				281	322	20	362	382	422	281	362	342	92	208	389	328	308
15.9.2005				281	301	20	362	402	402	241	362	342	100	201	389	315	302
28.9.2005	935	929	923	301	281	0	362	382	382	241	342	322	113	194	375	302	290
26.10.2005				281	201	-101	322	382	342	201	302	302	141	127	348	268	248
24.11.2005	936	930	923	301	281	-60	302	362	382	261	362	342	170	174	348	322	281
27.2.2006				281	281	-60	342	402	402	221	362	322	265	167	382	302	284
18.4.2006				281	281	0	362	402	322	221	342	281	315	188	362	281	277
14.6.2006	935	930	922	261	261	0	382	402	362	221	362	261	372	174	382	281	279

F26/022/N

Virumakokeiden tulokset

65 %	Paino	Viruma+kutistuma									Aika	Keskiarvo: vir+kut				Kutistuma	VIRUMA
14.6.2005	kg	Kpl 10			Kpl 11			Kpl 12			d	Kpl 10	Kpl 11	Kpl 12	Kaikki	Kaikki	Kaikki
14.6.2005		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14.6.2005	44,554	985	945	523	1186	1005	1327	1226	703	1307	0	817	1173	1079	1023	132	891
15.6.2005	44,554	1286	1206	1126	1548	965	1568	1588	905	1508	1	1206	1360	1333	1300	199	1101
15.6.2005		1407	1266	1307	1789	1025	1709	1789	985	1709	1	1327	1508	1494	1443	199	1244
16.6.2005	44,554	1588	1487	1427	2050	1226	1889	2030	1226	1889	2	1501	1722	1715	1646	272	1374
17.6.2005	44,555	1789	1709	1568	2231	1487	2070	2211	1407	2090	3	1688	1930	1903	1840	319	1521
18.6.2005	44,554	1889	1749	1688	2392	1447	2191	2372	1467	2211	4	1776	2010	2017	1934	353	1581
20.6.2005	44,554	2050	1930	1729	2573	1628	2231	2533	1688	2271	6	1903	2144	2164	2070	333	1738
21.6.2005	44,554	2070	1990	1789	2633	1749	2312	2593	1709	2332	7	1950	2231	2211	2131	382	1749
22.6.2005		2171	2010	1809	2754	1789	2332	2673	1729	2372	8	1997	2291	2258	2182	384	1798
23.6.2005	44,554	2191	2090	1889	2814	1849	2412	2754	1829	2452	9	2057	2358	2345	2253	400	1854
24.6.2005		2231	2131	1869	2854	1910	2432	2794	1789	2432	10	2077	2399	2338	2271	395	1876
27.6.2005	44,554	2291	2211	2030	2955	1930	2573	2915	1869	2613	13	2178	2486	2466	2376	333	2044
29.6.2005		2312	2231	2050	2955	1970	2593	2915	1889	2593	15	2198	2506	2466	2390	400	1990
1.7.2005		2332	2291	2010	3035	2050	2613	2955	1950	2613	17	2211	2566	2506	2428	398	2030
5.7.2005	44,553	2352	2312	2050	3055	2030	2673	2995	1950	2653	21	2238	2586	2533	2452	400	2052
8.7.2005		2332	2372	2010	3035	2090	2653	2975	1990	2633	24	2238	2593	2533	2454	391	2064
15.7.2005	44,552	2472	2452	2131	3196	2131	2754	3136	2151	2754	31	2352	2693	2680	2575	393	2182
21.7.2005		2432	2492	2111	3216	2191	2794	3196	2191	2794	37	2345	2734	2727	2602	420	2182
29.7.2005		2573	2533	2251	3337	2312	2874	3276	2171	2814	45	2452	2841	2754	2682	433	2249
8.8.2005	44,550	2653	2613	2231	3457	2352	2955	3377	2231	2894	55	2499	2921	2834	2751	406	2345
15.8.2005		2613	2633	2251	3457	2352	2955	3397	2291	2915	62	2499	2921	2868	2763	429	2334
23.8.2005		2714	2653	2312	3497	2392	2915	3357	2271	2834	70	2559	2935	2821	2772	404	2367
30.8.2005	44,550	2734	2593	2312	3538	2332	2915	3417	2271	2854	77	2546	2928	2848	2774	424	2349
6.9.2005		2693	2633	2291	3497	2271	2955	3437	2271	2834	84	2539	2908	2848	2765	411	2354
14.9.2005		2774	2754	2312	3578	2412	3015	3497	2352	3015	92	2613	3002	2955	2856	411	2446
27.9.2005	44,548	2814	2774	2412	3759	2412	3095	3658	2352	3095	105	2667	3089	3035	2930	424	2506
18.10.2005		2774	2734	2452	3759	2412	3136	3638	2372	3156	126	2653	3102	3055	2937	431	2506
18.11.2005	44,548	2935	2854	2533	3899	2553	3256	3839	2492	3256	157	2774	3236	3196	3069	476	2593
3.1.2006		2874	2814	2472	3899	2533	3136	3819	2432	3156	203	2720	3189	3136	3015	518	2497
5.4.2006		3095	3116	2693	4040	2794	3256	3920	2714	3236	295	2968	3363	3290	3207	538	2669
14.6.2006	44,546	3116	3116	2653	4080	2894	3337	4020	2774	3317	365	2961	3437	3370	3256	592	2664

F26/022/N

Virumakokeiden tulokset

85 %	Paino	Viruma+kutistuma									Aika	Keskiarvo: vir+kut				Kutistuma	VIRUMA
14.6.2005	kg	Kpl 7			Kpl 8			Kpl 9			d	Kpl 7	Kpl 8	Kpl 9	Kaikki	Kaikki	Kaikki
14.6.2005		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14.6.2005	46,639	1106	1528	1608	1668	1166	1327	1367	1508	1487	0	1414	1387	1454	1418	219	1199
15.6.2005	46,640	1206	1608	1849	1849	945	1467	1387	1688	1668	1	1554	1420	1581	1519	199	1320
15.6.2005		1226	1729	1869	1588	1126	1588	1528	1709	1749	1	1608	1434	1662	1568	199	1369
16.6.2005	46,640	1226	1869	2090	2030	1166	1688	1608	1849	1889	2	1729	1628	1782	1713	248	1465
17.6.2005	46,640	1206	2171	2211	2111	1226	1950	1568	1889	2050	3	1863	1762	1836	1820	250	1570
18.6.2005	46,640	1266	2312	2271	2171	1387	2070	1729	1990	2171	4	1950	1876	1963	1930	286	1644
20.6.2005	46,640	1307	2633	2251	2111	1548	2291	1910	1930	2332	6	2064	1983	2057	2035	313	1722
21.6.2005	46,640	1367	2653	2251	2131	1548	2372	1950	1970	2392	7	2090	2017	2104	2070	335	1735
22.6.2005		1427	2794	2211	2070	1588	2452	1990	1970	2452	8	2144	2037	2137	2106	317	1789
23.6.2005	46,641	1387	2814	2231	2090	1568	2513	2050	1990	2472	9	2144	2057	2171	2124	355	1769
24.6.2005		1447	2894	2131	1950	1588	2613	2010	1889	2533	10	2157	2050	2144	2117	355	1762
27.6.2005	46,641	1528	2955	2151	1990	1668	2633	2050	1930	2573	13	2211	2097	2184	2164	348	1816
29.6.2005		1568	2975	2131	1970	1688	2714	2111	1930	2633	15	2224	2124	2224	2191	315	1876
1.7.2005		1628	3075	2151	1990	1769	2794	2151	1950	2693	17	2285	2184	2265	2245	342	1903
5.7.2005	46,641	1668	3075	2131	2030	1809	2794	2171	1990	2714	21	2291	2211	2291	2265	335	1930
8.7.2005		1668	3075	2090	1970	1809	2794	2151	1970	2714	24	2278	2191	2278	2249	288	1961
15.7.2005	46,640	1729	3196	2191	2050	1869	2874	2231	2030	2714	31	2372	2265	2325	2320	319	2001
21.7.2005		1729	3196	2171	1970	1789	2874	2251	1990	2673	37	2365	2211	2305	2294	304	1990
29.7.2005		1869	3317	2312	2211	1990	3015	2352	2171	2874	45	2499	2405	2466	2457	351	2106
9.8.2005	46,641	1970	3377	2312	2111	2111	3095	2432	2191	3015	56	2553	2439	2546	2513	333	2180
16.8.2005		2010	3397	2312	2111	2131	3116	2472	2231	3055	63	2573	2452	2586	2537	310	2227
24.8.2005		2030	3397	2312	2231	2111	3116	2452	2291	3075	71	2580	2486	2606	2557	322	2236
31.8.2005	46,640	2171	3377	2352	2392	2030	3075	2553	2432	3035	78	2633	2499	2673	2602	304	2298
7.9.2005		2171	3337	2412	2332	2191	3035	2553	2432	3035	85	2640	2519	2673	2611	308	2303
15.9.2005		2231	3296	2533	2472	2251	3015	2613	2533	3095	93	2687	2580	2747	2671	302	2370
28.9.2005	46,638	2231	3377	2452	2392	2352	3015	2633	2432	3055	106	2687	2586	2707	2660	290	2370
26.10.2005		2251	3296	2452	2392	2332	3015	2613	2472	3095	134	2667	2580	2727	2658	248	2410
29.11.2005	46,640	2111	3337	2492	2553	2251	2955	2553	2573	3055	168	2647	2586	2727	2653	281	2372
24.1.2006		2231	3317	2492	2553	2271	2975	2513	2573	3075	224	2680	2600	2720	2667	284	2383
13.4.2006		2452	3457	2613	2693	2492	3116	2774	2714	3196	303	2841	2767	2894	2834	277	2557
14.6.2006	46,639	2513	3497	2693	2734	2553	3156	2754	2754	3176	365	2901	2814	2894	2870	279	2591

F26/022/H

Kutistumakokeiden tulokset

65% RH	Paino [g]			Kutistuma									Aika	Keskiarvo			
7.6.2005	Kpl 13	Kpl 14	Kpl 15	Kpl 13			Kpl 14			Kpl 15			[d]	Kpl 13	Kpl 14	Kpl 15	Kaik ki
8.6.2005	936,3	943,4	947,3		0	0	0		0	0	0	0	1	0	0	0	0
10.6.2005	937,6	945,3	949,1		563	683	523		281	985	764	864	3	623	402	871	632
11.6.2005	938,0	945,7	949,5		864	864	704		402	1166	965	925	4	864	553	1018	812
12.6.2005	940,2	947,4	951,1		784	884	744		342	1146	985	945	5	834	543	1025	801
13.6.2005	939,6	947,6	950,9		824	925	683		382	1126	925	905	6	874	533	985	797
14.6.2005	926,8	937,2	939,8		784	864	643		402	1166	965	925	7	824	523	1018	788
15.6.2005	926	936	939		864	884	683		482	1166	905	864	8	874	583	978	812
16.6.2005	926	936	939		884	965	643		503	1126	905	925	9	925	573	985	827
17.6.2005	926	936	940		905	925	683		503	1146	965	884	10	915	593	998	835
18.6.2005	926	936	940		945	925	704		563	1085	945	925	11	935	633	985	851
20.6.2005	926	936	940		925	925	663		482	1146	905	905	13	925	573	985	827
21.6.2005	927	935	939		925	925	663		563	1106	905	884	14	925	613	965	834
22.6.2005	927	935	939		925	824	603		543	1106	905	844	15	874	573	951	800
23.6.2005	926	936	939		905	844	643		563	1126	864	905	16	874	603	965	814
24.6.2005	926	936	939		864	824	583		543	1106	864	905	17	844	563	958	788
27.6.2005	925	936	939		804	724	503		503	1045	784	683	20	764	503	838	701
1.7.2005	925	936	939		804	784	563		503	1045	784	824	24	794	533	884	737
5.7.2005	925	935	940		824	744	523		523	1045	764	824	28	784	523	878	728
8.7.2005	925	935	940		744	744	462		503	1005	744	784	31	744	482	844	690
15.7.2005	927	936	940		704	704	442		482	985	744	724	38	704	462	817	661
21.7.2005	927	936	940		704	704	482		482	985	744	704	44	704	482	811	666
8.8.2005	926	936	939		724	683	422		442	965	703	663	62	704	432	777	638
15.8.2005					704	683	422		442	945	744	724	69	693	432	804	643
23.8.2005					683	704	402		402	905	703	704	77	693	402	771	622
30.8.2005	926	936	940		704	663	402		402	905	663	643	84	683	402	737	607
6.9.2005					683	663	382		362	884	663	623	91	673	372	724	590
14.9.2005					704	643	402		362	905	643	643	99	673	382	730	595
27.9.2005	925	935	938		704	724	402		402	884	643	663	112	714	402	730	615
17.10.2005					603	623	322		342	824	623	583	132	613	332	677	540
18.11.2005	925	936	939		623	603	402		322	844	623	643	164	613	362	704	559
9.2.2006					583	623	422		362	864	643	623	247	603	392	710	568
13.4.2006					563	603	442		322	804	643	603	310	583	382	683	549
15.6.2006	924	934	938		563	643	442		362	844	683	623	373	603	402	717	574

F26/022/H

Kutistumakokeiden tulokset

85% RH	Paino [g]			Kutistuma									Aika	Keskiarvo			
7.6.2005	Kpl 16	Kpl 17	Kpl 18	Kpl 16			Kpl 17			Kpl 18			[d]	Kpl 16	Kpl 17	Kpl 18	Kaikki
8.6.2005	927,9	938,1	935,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
10.6.2005	929,8	940,0	937,5	362	583	744	623	724	663	583	623	764	3	563	670	657	630
11.6.2005	930,2	940,3	937,9	623	824	925	764	945	824	804	884	925	4	791	844	871	835
12.6.2005	931,5	942,1	939,6	643	864	844	784	945	844	784	844	925	5	784	858	851	831
13.6.2005	931,9	941,9	939,4	523	844	945	764	905	844	764	784	904	6	771	838	817	808
14.6.2005	917,5	930,8	928,3	563	864	945	703	905	844	764	824	925	7	791	817	837	815
15.6.2005	918	930	928	583	804	905	744	925	864	764	824	945	8	764	844	844	817
16.6.2005	917	930	928	603	864	905	744	925	864	764	824	904	9	791	844	831	822
17.6.2005	917	930	927	603	844	884	744	945	844	764	804	904	10	777	844	824	815
18.6.2005	917	930	927	603	864	884	744	925	824	764	804	824	11	784	831	797	804
20.6.2005	917	930	927	523	824	884	683	884	804	724	804	884	13	744	791	804	779
21.6.2005	917	931	929	583	804	905	724	905	804	724	784	864	14	764	811	791	788
22.6.2005	917	931	929	523	764	844	683	864	744	683	764	864	15	710	764	771	748
23.6.2005	918	931	928	503	824	844	683	824	764	703	784	844	16	724	757	777	753
24.6.2005	918	931	928	442	784	864	683	864	744	683	764	864	17	697	764	771	744
27.6.2005	917	930	928	523	804	864	683	864	724	683	744	864	20	730	757	764	750
1.7.2005	917	930	928	482	764	824	643	824	663	623	663	824	24	690	710	703	701
5.7.2005	918	930	927	462	764	804	623	764	643	583	703	804	28	677	677	697	683
8.7.2005	918	931	927	362	683	724	503	704	523	482	623	663	31	590	576	590	585
15.7.2005	918	931	929	402	663	744	482	704	523	462	603	683	38	603	570	583	585
21.7.2005	918	931	929	322	683	724	462	683	523	482	623	703	44	576	556	603	578
9.8.2005	918	931	928	342	643	683	442	643	482	482	603	643	63	556	523	576	552
16.8.2005				322	623	643	422	603	462	462	543	603	70	529	496	536	520
24.8.2005				302	623	643	402	603	482	442	543	643	78	523	496	543	520
31.8.2005	919	931	930	302	583	623	402	583	422	382	523	623	85	503	469	509	494
7.9.2005				261	603	603	402	583	422	402	503	603	92	489	469	502	487
15.9.2005				281	563	603	382	563	402	382	523	583	100	482	449	496	476
28.9.2005	917	930	929	261	543	583	382	543	362	362	482	603	113	462	429	482	458
26.10.2005				201	482	543	281	482	241	301	402	523	141	409	335	409	384
24.11.2005	918	931	928	181	543	583	322	503	342	342	422	523	170	436	389	429	418
27.2.2006				121	462	523	301	462	342	342	402	543	265	369	369	429	389
18.4.2006				101	422	503	322	462	322	301	382	503	315	342	368	395	368
15.6.2006	917	931	928	121	462	482	281	462	301	301	422	523	373	355	348	415	373

F26/022/H Virumakokeiden tulokset

65 %	Paino	Viruma+kutistuma									Aika	Keskiarvo: vir+kut				Kutistuma	VIRUMA
15.6.2005	kg	Kpl 4			Kpl 5			Kpl 6			d	Kpl 4	Kpl 5	Kpl 6	Kaikki	Kaikki	Kaikki
15.6.2005		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15.6.2005	46,649	985	1628	1668	1025	1246	2271	945	1226	2633	0	1427	1514	1601	1514	812	702
15.6.2005		965	1648	1688	965	1266	2251	985	1146	2673	0	1434	1494	1601	1510	812	698
16.6.2005	46,649	1126	1729	1729	1126	1367	2312	1025	1286	2673	1	1528	1601	1662	1597	827	769
17.6.2005	46,649	1206	1709	1668	1186	1327	2312	1085	1347	2653	2	1528	1608	1695	1610	835	775
18.6.2005	46,649	1226	1749	1608	1226	1347	2231	1085	1266	2613	3	1528	1601	1655	1595	851	744
20.6.2005	46,649	1226	1749	1588	1266	1367	2231	1085	1266	2613	5	1521	1621	1655	1599	827	772
21.6.2005	46,650	1246	1769	1628	1186	1387	2231	1106	1266	2633	6	1548	1601	1668	1606	834	772
22.6.2005	46,649	1246	1769	1588	1206	1387	2231	1126	1266	2613	7	1534	1608	1668	1604	800	804
23.6.2005		1286	1809	1608	1266	1427	2231	1146	1327	2633	8	1568	1642	1702	1637	814	823
24.6.2005		1286	1809	1608	1266	1427	2231	1146	1307	2633	9	1568	1642	1695	1635	788	846
27.6.2005	44,649	1307	1829	1588	1206	1427	2191	1186	1266	2613	12	1575	1608	1688	1624	701	922
1.7.2005		1307	1849	1588	1166	1427	2191	1126	1106	2653	16	1581	1595	1628	1601	737	864
5.7.2005	46,650	1106	1849	1709	905	1407	2271	985	1045	2714	20	1554	1528	1581	1554	728	826
8.7.2005		1065	1809	1648	804	1347	2231	945	985	2673	23	1508	1461	1534	1501	690	811
15.7.2005	46,649	1106	1849	1668	764	1387	2231	945	985	2693	30	1541	1461	1541	1514	661	853
21.7.2005		1106	1829	1608	744	1327	2191	925	965	2633	36	1514	1420	1508	1481	666	815
8.8.2005	46,649	1166	1829	1648	905	1367	2191	985	905	2714	54	1548	1487	1534	1523	638	886
15.8.2005		1166	1869	1668	864	1387	2231	1065	945	2714	61	1568	1494	1575	1545	643	902
23.8.2005		905	1970	1789	643	1487	2271	844	985	2734	69	1554	1467	1521	1514	622	892
30.8.2005	46,649	804	1950	1889	482	1387	2312	784	945	2734	76	1548	1394	1487	1476	607	869
6.9.2005		804	2010	2030	482	1427	2452	824	925	2874	83	1615	1454	1541	1537	590	947
14.9.2005		844	1990	2070	442	1467	2492	824	945	2854	91	1635	1467	1541	1548	595	953
27.9.2005	46,649	864	2131	2131	462	1528	2533	884	965	2975	104	1709	1508	1608	1608	615	993
18.10.2005		844	2131	2131	402	1467	2573	804	1005	2915	125	1702	1481	1575	1586	540	1045
18.11.2005	46,648	884	2211	2191	402	1608	2774	925	1045	3095	156	1762	1595	1688	1682	559	1122
3.1.2006		724	2111	2231	241	1588	2693	784	1085	3035	202	1688	1508	1635	1610	568	1042
5.4.2006		864	2271	2231	342	1729	2693	905	1126	3095	294	1789	1588	1709	1695	549	1146
15.6.2006	46,647	764	2251	2211	281	1688	2693	844	1106	3136	365	1742	1554	1695	1664	574	1090

F26/022/H

Virumakokeiden tulokset

85 %	Paino	Viruma+kutistuma									Aika	Keskiarvo: vir+kut				Kutistuma	VIRUMA
15.6.2005	kg	Kpl 1			Kpl 2			Kpl 3			d	Kpl 1	Kpl 2	Kpl 3	Kaikki	Kaikki	Kaikki
15.6.2005		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15.6.2005	43,865	1688	1608	1347	1849	1528	1327	1950	1347	1347	0	1548	1568	1548	1554	817	737
15.6.2005		1809	1668	1347	1668	1548	1327	1950	1407	1407	0	1608	1514	1588	1570	817	753
16.6.2005	43,864	1869	1729	1407	1729	1608	1347	2010	1427	1467	1	1668	1561	1635	1621	822	800
17.6.2005	43,864	1889	1829	1528	1829	1709	1467	2151	1447	1588	2	1749	1668	1729	1715	815	900
18.6.2005	43,864	1910	1829	1528	1829	1648	1487	2131	1427	1548	3	1755	1655	1702	1704	804	900
20.6.2005	43,865	1910	1809	1508	1789	1628	1467	2090	1427	1568	5	1742	1628	1695	1688	779	909
21.6.2005	43,864	1910	1849	1528	1789	1628	1467	2090	1427	1568	6	1762	1628	1695	1695	788	907
22.6.2005		1930	1849	1548	1809	1648	1508	2111	1387	1608	7	1776	1655	1702	1711	748	963
23.6.2005	43,865	1950	1889	1548	1829	1668	1508	2111	1407	1648	8	1796	1668	1722	1729	753	976
24.6.2005		1950	1889	1568	1809	1688	1508	2010	1427	1648	9	1802	1668	1695	1722	744	978
27.6.2005	43,865	1950	1910	1588	1809	1668	1548	2070	1427	1688	12	1816	1675	1729	1740	750	989
1.7.2005		1970	1930	1588	1829	1688	1528	2050	1407	1648	16	1829	1682	1702	1738	701	1036
5.7.2005	43,866	1930	1910	1568	1829	1668	1508	2131	1407	1588	20	1802	1668	1709	1726	683	1043
8.7.2005		1910	1869	1508	1769	1608	1407	2131	1347	1548	23	1762	1595	1675	1677	585	1092
15.7.2005	43,865	1910	1869	1467	1789	1628	1367	2131	1387	1568	30	1749	1595	1695	1679	585	1094
21.7.2005		1869	1889	1508	1749	1628	1367	2090	1347	1548	36	1755	1581	1662	1666	578	1088
9.8.2005	43,866	1930	1889	1508	1709	1648	1307	2050	1286	1568	55	1776	1554	1635	1655	552	1103
16.8.2005		1869	1869	1467	1688	1608	1307	2050	1286	1548	62	1735	1534	1628	1633	520	1112
24.8.2005		1990	2070	1427	1769	1869	1286	2191	1548	1528	70	1829	1642	1755	1742	520	1222
31.8.2005	43,866	1930	2050	1407	1668	1769	1126	2030	1347	1467	77	1796	1521	1615	1644	494	1150
7.9.2005		2030	2090	1407	1769	1809	1206	2050	1387	1467	84	1843	1595	1635	1691	487	1204
15.9.2005		2050	2131	1427	1789	1869	1186	2131	1467	1508	92	1869	1615	1702	1729	476	1253
28.9.2005	43,865	2030	2131	1447	1769	1849	1206	2151	1447	1508	105	1869	1608	1702	1726	458	1269
26.10.2005		1950	2111	1387	1809	1829	1166	2211	1447	1467	133	1816	1601	1709	1709	384	1324
29.11.2005	43,868	1990	2171	1407	1829	1829	1186	2191	1387	1487	167	1856	1615	1688	1720	418	1302
24.1.2006		1990	2131	1447	1849	1849	1166	2271	1487	1487	223	1856	1621	1749	1742	389	1353
13.4.2006		2010	2211	1467	1910	1950	1266	2312	1528	1608	302	1896	1709	1816	1807	368	1438
15.6.2006	43,867	2090	2271	1548	1889	1930	1307	2291	1608	1668	365	1970	1709	1856	1845	373	1472

F3/022/N

Kutistumakokeiden tulokset

65% RH	Paino [g]			Kutistuma									Aika	Keskiarvo			
9.6.2005	Kpl 19	Kpl 20	Kpl 21	Kpl 19			Kpl 20			Kpl 21			[d]	Kpl 19	Kpl 20	Kpl 21	Kaikki
10.6.2005	940,4	949,2	935,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
11.6.2005	944,1	953,3	939,3	-20	0	-20	101	-141	20	-20	-121	-60	2	-13	-7	-67	-29
12.6.2005	944,4	954,2	940,0	-80	-60	20	80	-121	-40	0	-80	-40	3	-40	-27	-40	-36
13.6.2005	945,8	954,8	940,7	0	20	121	101	-101	-20	0	-20	-20	4	47	-7	-13	9
15.6.2005	945,9	955,2	941,4	60	101	141	221	20	121	101	80	80	6	101	121	87	103
16.6.2005	934,7	942,7	923,6	80	121	161	221	40	40	101	80	101	7	121	101	94	105
17.6.2005	934	942	924	201	181	241	342	101	141	201	181	261	8	208	194	214	205
18.6.2005	934	942	924	261	322	302	422	241	241	322	302	322	9	295	302	315	304
20.6.2005	934	942	924	281	402	382	482	301	301	503	362	382	11	355	362	415	377
21.6.2005	934	941	923	322	442	442	503	342	322	442	362	422	12	402	389	409	400
22.6.2005	934	941	923	322	442	442	482	322	362	422	342	422	13	402	389	395	395
23.6.2005	933	939	922	402	482	503	543	382	422	462	422	442	14	462	449	442	451
24.6.2005	933	939	922	322	482	482	503	342	402	462	422	402	15	429	415	429	424
26.6.2005	932	941	922	322	442	402	442	402	402	442	382	422	17	389	415	415	406
27.6.2005	932	941	922	281	462	482	523	382	382	442	402	442	18	409	429	429	422
29.6.2005	933	940	922	362	482	503	503	382	362	442	362	442	20	449	415	415	427
1.7.2005	933	940	922	382	503	462	523	402	402	442	402	422	22	449	442	422	438
5.7.2005	932	940	921	362	503	523	523	382	362	442	422	462	26	462	422	442	442
8.7.2005	932	940	921	302	482	442	523	382	342	362	382	322	29	409	415	355	393
15.7.2005	932	939	922	322	442	523	503	422	422	362	382	342	36	429	449	362	413
21.7.2005	932	939	922	322	543	543	523	422	442	422	342	422	42	469	462	395	442
29.7.2005	932	939	922	422	563	523	563	482	482	462	442	462	50	503	509	456	489
8.8.2005	931	939	920	322	543	462	563	462	422	362	402	402	60	442	482	389	438
15.8.2005				362	583	563	543	503	482	462	382	442	67	503	509	429	480
23.8.2005				322	543	523	503	422	442	402	402	442	75	462	456	415	444
30.8.2005	932	939	921	322	543	503	523	402	422	402	422	442	82	456	449	422	442
6.9.2005				362	563	503	503	462	462	402	422	402	89	476	476	409	453
14.9.2005				382	543	543	523	442	422	402	402	442	97	489	462	415	456
27.9.2005	930	937	919	382	543	543	523	422	462	422	402	442	110	489	469	422	460
17.10.2005				362	583	563	523	422	442	462	422	462	130	503	462	449	471
18.11.2005	931	937	919	422	603	563	583	442	503	543	462	503	162	529	509	503	514
9.2.2006				503	683	643	683	563	543	603	583	603	245	610	596	596	601
13.4.2006				543	724	643	703	603	643	623	583	643	308	637	650	616	634
16.6.2006	930	937	919	583	744	683	724	643	663	643	623	643	372	670	677	637	661

F3/022/N

Kutistumakokeiden tulokset

85% RH	Paino [g]			Kutistuma, laskettu									Aika	Keskiarvo			
9.6.2005	Kpl 22	Kpl 23	Kpl 24	Kpl 22			Kpl 23			Kpl 24			[d]	Kpl 22	Kpl 23	Kpl 24	Kaikki
10.6.2005	947,0	958,1	954,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
11.6.2005	950,9	962,0	958,2	0	-60	80	101	-40	0	-40	-101	40	2	7	20	-33	-2
12.6.2005	951,9	962,5	958,9	40	-80	101	121	-20	40	-101	-40	0	3	20	47	-47	7
13.6.2005	952,5	963,4	959,5	20	-60	241	121	20	80	60	-60	20	4	67	74	7	49
15.6.2005	952,8	963,7	959,8	101	40	342	241	80	121	101	40	161	6	161	147	101	136
16.6.2005	934,9	945,5	946,1	121	60	442	221	80	141	101	80	101	7	208	147	94	150
17.6.2005	934	943	945	141	121	523	342	201	261	181	181	261	8	261	268	208	246
18.6.2005	934	943	945	201	201	603	362	241	281	281	241	322	9	335	295	281	304
20.6.2005	934	943	945	201	221	704	382	281	261	302	281	302	11	375	308	295	326
21.6.2005	934	944	945	301	241	744	422	261	362	322	342	382	12	429	348	348	375
22.6.2005	934	944	945	322	221	724	402	281	302	322	301	281	13	422	328	302	351
23.6.2005	935	944	945	322	302	784	442	322	362	362	342	322	14	469	375	342	395
24.6.2005	935	944	945	322	302	784	543	322	362	382	362	322	15	469	409	355	411
26.6.2005	934	945	946	281	241	744	442	221	281	281	281	322	17	422	315	295	344
27.6.2005	934	945	946	322	281	764	442	302	382	322	322	281	18	456	375	308	380
29.6.2005	934	944	945	281	281	764	442	302	362	342	342	322	20	442	369	335	382
1.7.2005	934	944	945	281	302	764	442	302	362	322	342	342	22	449	369	335	384
5.7.2005	935	944	946	261	302	784	462	322	362	382	322	322	26	449	382	342	391
8.7.2005	935	944	946	201	241	704	382	241	281	322	281	221	29	382	302	275	319
15.7.2005	936	945	946	181	302	744	442	302	302	342	322	261	36	409	348	308	355
21.7.2005	936	945	946	201	181	764	402	261	362	322	362	161	42	382	342	281	335
29.7.2005	936	945	946	241	241	784	442	302	362	362	382	281	50	422	369	342	377
9.8.2005	934	945	945	241	261	804	402	281	382	342	362	261	61	436	355	322	371
16.8.2005				201	261	764	402	261	382	281	362	221	68	409	348	288	348
24.8.2005				241	261	784	402	261	362	281	362	261	76	429	342	302	357
31.8.2005	935	944	945	221	221	764	362	221	342	241	342	241	83	402	308	275	328
7.9.2005				221	241	784	362	261	382	241	362	221	90	415	335	275	342
15.9.2005				241	261	724	362	221	342	281	342	221	98	409	308	281	333
28.9.2005	935	944	945	241	241	704	342	181	302	261	301	181	111	395	275	248	306
26.10.2005				241	221	683	342	181	322	241	322	181	139	382	281	248	304
24.11.2005	935	945	945	281	241	583	442	261	382	302	362	281	168	369	362	315	348
27.2.2006				301	241	583	422	302	382	342	362	241	263	375	369	315	353
18.4.2006				201	221	583	442	302	382	281	322	261	313	335	375	288	333
16.6.2006	934	944	945	301	281	563	442	342	402	322	362	281	372	382	395	322	366

F3/022/N

Virumakokeiden tulokset

65% RH	Paino	Viruma+kutistuma									Aika	Keskiarvo: vir+kut				Kutistuma	VIRUMA
	kg	Kpl 10			Kpl 11			Kpl 12			d	Kpl 10	Kpl 11	Kpl 12	Kaikki	Kaikki	Kaikki
16.6.2005		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16.6.2005	44,135	804	1206	1226	724	1106	1327	784	1226	1266	0	1079	1052	1092	1074	105	969
16.6.2005		884	1387	1246	884	1286	1347	904	1327	1307	0	1173	1173	1179	1175	105	1070
17.6.2005	44,134	1126	1648	1608	1166	1508	1688	1226	1588	1608	1	1461	1454	1474	1463	205	1257
18.6.2005	44,134	1327	1829	1789	1387	1628	1869	1447	1688	1809	2	1648	1628	1648	1642	304	1338
20.6.2005		1528	2030	1950	1568	1829	2070	1628	1869	2030	4	1836	1822	1843	1834	377	1456
21.6.2005	44,133	1588	2131	2070	1588	1910	2191	1648	1990	2111	5	1930	1896	1916	1914	400	1514
22.6.2005	44,133	1709	2231	2151	1729	1970	2291	1769	2050	2271	6	2030	1997	2030	2019	395	1624
23.6.2005	44,134	1829	2332	2312	1829	2030	2472	1849	2111	2412	7	2157	2111	2124	2131	451	1679
24.6.2005		1849	2372	2352	1889	2090	2472	1910	2151	2412	8	2191	2151	2157	2166	424	1742
26.6.2005	44,132	1970	2533	2372	2010	2191	2573	2010	2191	2513	10	2291	2258	2238	2262	406	1856
27.6.2005	44,133	1990	2573	2432	2050	2211	2573	2070	2231	2553	11	2332	2278	2285	2298	422	1876
29.6.2005		2030	2593	2492	2070	2231	2653	2050	2211	2593	13	2372	2318	2285	2325	427	1898
1.7.2005		2030	2633	2553	2131	2251	2734	2111	2231	2693	15	2405	2372	2345	2374	438	1936
5.7.2005	44,131	2131	2693	2573	2191	2291	2734	2171	2312	2754	19	2466	2405	2412	2428	442	1985
8.7.2005		2131	2693	2553	2151	2271	2754	2151	2231	2714	22	2459	2392	2365	2405	393	2012
15.7.2005	44,131	2151	2834	2613	2151	2412	2874	2251	2312	2814	29	2533	2479	2459	2490	413	2077
21.7.2005		2251	2955	2834	2251	2492	3055	2251	2412	2915	35	2680	2600	2526	2602	442	2160
29.7.2005		2291	3075	2915	2271	2573	3176	2251	2492	3055	43	2760	2673	2600	2678	489	2189
8.8.2005	4,132	2372	3095	2975	2352	2593	3276	2291	2513	3156	53	2814	2740	2653	2736	438	2298
15.8.2005		2412	3136	3015	2412	2633	3337	2312	2533	3156	60	2854	2794	2667	2772	480	2291
23.8.2005		2412	3095	2995	2372	2593	3236	2312	2492	3136	68	2834	2734	2647	2738	444	2294
30.8.2005	44,129	2392	3095	2955	2372	2573	3276	2231	2412	3116	75	2814	2740	2586	2714	442	2271
6.9.2005		2412	3075	3055	2332	2593	3397	2211	2372	3176	82	2848	2774	2586	2736	453	2282
14.9.2005		2472	3156	3095	2392	2613	3357	2291	2492	3236	90	2908	2787	2673	2789	456	2334
27.9.2005	44,127	2513	3156	3116	2432	2653	3357	2291	2533	3256	103	2928	2814	2693	2812	460	2352
18.10.2005		2492	3156	3095	2432	2593	3397	2312	2573	3276	124	2915	2807	2720	2814	471	2343
17.11.2005	44,126	2533	3176	3176	2412	2693	3477	2352	2553	3397	154	2961	2861	2767	2863	514	2349
12.1.2006		2633	3276	3256	2573	2693	3538	2472	2593	3457	210	3055	2935	2841	2944	601	2343
5.4.2006		2714	3518	3578	2613	2955	3819	2492	2754	3558	293	3270	3129	2935	3111	634	2477
16.6.2006	44,123	2774	3598	3598	2673	3035	3940	2533	2894	3759	365	3323	3216	3062	3200	661	2539

F3/022/N

Virumakokeiden tulokset

85% RH	Paino	Viruma+kutistuma									Aika	Keskiarvo: vir+kut				Kutistuma	VIRUMA
16.6.2005	kg	Kpl 7			Kpl 8			Kpl 9			d	Kpl 7	Kpl 8	Kpl 9	Kaikki	Kaikki	Kaikki
16.6.2005		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16.6.2005	44,564	1347	1286	1106	1729	1106	905	1729	925	884	0	1246	1246	1179	1224	150	1074
16.6.2005		1447	1467	1307	1990	1246	1065	2050	1025	985	0	1407	1434	1353	1398	150	1248
17.6.2005	44,564	1668	1608	1709	2312	1286	1447	2392	1085	1327	1	1662	1682	1601	1648	246	1403
18.6.2005	44,564	1789	1729	2030	2492	1367	1729	2573	1226	1608	2	1849	1863	1802	1838	304	1534
20.6.2005	44,565	1829	1910	2191	2533	1447	1970	2613	1266	1889	4	1977	1983	1923	1961	326	1635
21.6.2005	44,564	1889	1910	2251	2593	1427	2030	2653	1226	1970	5	2017	2017	1950	1994	375	1619
22.6.2005		1910	2030	2332	2573	1568	2151	2613	1387	2070	6	2090	2097	2023	2070	351	1720
23.6.2005	44,563	1950	2111	2452	2613	1648	2251	2673	1447	2151	7	2171	2171	2090	2144	395	1749
24.6.2005		1970	2171	2492	2653	1729	2312	2693	1568	2191	8	2211	2231	2151	2198	411	1787
26.6.2005	44,564	2030	2191	2553	2714	1729	2372	2734	1548	2251	10	2258	2271	2178	2236	344	1892
27.6.2005	44,564	2070	2251	2613	2734	1829	2412	2874	1688	2312	11	2312	2325	2291	2309	380	1930
29.6.2005		2131	2251	2774	2734	1749	2513	2774	1688	2392	13	2385	2332	2285	2334	382	1952
1.7.2005		2171	2271	2854	2814	1809	2613	2894	1749	2452	15	2432	2412	2365	2403	384	2019
5.7.2005	44,564	2171	2291	2854	2834	1829	2613	2894	1749	2492	19	2439	2425	2379	2414	391	2023
8.7.2005		2191	2271	2834	2854	1809	2633	2915	1709	2472	22	2432	2432	2365	2410	319	2090
15.7.2005	44,565	2271	2312	2894	2915	1809	2653	2955	1688	2513	29	2492	2459	2385	2446	355	2090
21.7.2005		2251	2332	2915	2915	1849	2734	2995	1729	2553	35	2499	2499	2425	2475	335	2140
29.7.2005		2392	2412	3035	3116	1910	2834	3156	1789	2673	43	2613	2620	2539	2591	377	2213
9.8.2005	44,565	2432	2432	3055	3136	1889	2834	3136	1789	2673	54	2640	2620	2533	2597	371	2227
16.8.2005		2513	2432	3035	3216	1889	2935	3236	1829	2734	61	2660	2680	2600	2647	348	2298
24.8.2005		2573	2472	3236	3296	1849	3015	3236	1749	2894	69	2760	2720	2626	2702	357	2345
31.8.2005	44,564	2513	2492	3256	3216	1849	3055	3156	1648	2894	76	2754	2707	2566	2676	328	2347
7.9.2005		2533	2513	3256	3256	1869	3035	3216	1729	2834	83	2767	2720	2593	2693	342	2352
15.9.2005		2593	2573	3276	3276	1930	3055	3236	1829	2955	91	2814	2754	2673	2747	333	2414
28.9.2005	44,563	2633	2673	3357	3337	2030	3156	3256	1970	3035	104	2888	2841	2754	2827	306	2521
26.10.2005		2593	2633	3357	3276	1970	3136	3256	1930	2975	132	2861	2794	2720	2792	304	2488
29.11.2005	44,564	2633	2633	3377	3337	2010	3176	3317	1950	3035	166	2881	2841	2767	2830	348	2481
24.1.2006		2693	2714	3578	3417	1950	3317	3337	1990	3035	222	2995	2894	2787	2892	353	2539
13.4.2006		2774	2935	3739	3618	2231	3558	3558	2090	3276	301	3149	3136	2975	3086	333	2754
16.6.2006	44,563	2834	2935	3799	3719	1990	3678	3618	2090	3437	365	3189	3129	3049	3122	366	2756

F3/022/H Kutistumakokeiden tulokset

65% RH	Paino [g]			Kutistuma									Aika	Keskiarvo			
9.6.2005	Kpl 13	Kpl 14	Kpl 15	Kpl 13			Kpl 14			Kpl 15			[d]	Kpl 13	Kpl 14	Kpl 15	Kaikki
10.6.2005	938,7	953,6	936,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
12.6.2005	937,3	955,3	937,8	683	462	844	925	864	1166	945	764	925	3	663	985	878	842
13.6.2005	938,5	956,7	939,5	824	523	985	905	884	1186	1065	945	1126	4	777	992	1045	938
15.6.2005	939,6	957,4	940,0	764	523	985	925	905	1126	1005	905	1045	6	757	985	985	909
16.6.2005	927,5	941,0	924,4	804	503	985	925	884	1106	1005	965	1065	7	764	972	1012	916
17.6.2005	927	940	925	784	543	1045	905	864	1106	905	945	1025	8	791	958	958	902
18.6.2005	927	940	924	764	482	1025	965	884	1106	985	945	1065	9	757	985	998	913
20.6.2005	927	940	924	804	382	985	1045	864	1065	965	925	1045	11	724	992	978	898
21.6.2005	927	940	923	844	442	985	1005	824	1045	965	925	1005	12	757	958	965	893
22.6.2005	927	940	923	824	422	965	945	784	1025	945	905	985	13	737	918	945	867
23.6.2005	927	940	923	804	482	985	985	844	1045	965	905	1005	14	757	958	958	891
24.6.2005	927	940	923	764	422	965	945	764	985	945	864	985	15	717	898	931	849
27.6.2005	927	940	923	703	342	904	945	663	945	844	784	925	18	650	851	851	784
1.7.2005	927	940	923	724	442	884	945	764	965	864	844	925	22	683	891	878	817
5.7.2005	927	940	923	703	462	884	965	764	945	884	784	925	26	683	891	864	813
8.7.2005	927	940	923	703	382	864	864	643	884	764	724	864	29	650	797	784	744
15.7.2005	927	940	923	683	362	884	965	663	905	784	804	905	36	643	844	831	773
21.7.2005	927	940	923	643	362	804	965	663	804	764	744	884	42	603	811	797	737
8.8.2005	926	940	923	583	382	804	945	563	824	703	764	804	60	590	777	757	708
15.8.2005				643	382	824	965	623	884	703	764	844	67	616	824	771	737
23.8.2005				583	382	824	925	603	844	683	744	844	75	596	791	757	715
30.8.2005	927	940	924	543	342	744	945	623	804	724	764	804	82	543	791	764	699
6.9.2005				523	342	744	925	603	804	683	764	724	89	536	777	724	679
14.9.2005				543	322	724	884	583	784	683	744	724	97	529	750	717	666
27.9.2005	926	939	923	523	362	764	864	583	764	663	724	724	110	549	737	704	663
17.10.2005				523	342	724	884	543	724	683	704	724	130	529	717	704	650
18.11.2005	926	940	924	523	322	764	905	603	764	683	744	724	162	536	757	717	670
9.2.2006				523	322	744	884	623	764	703	724	724	245	529	757	717	668
13.4.2006				523	362	764	884	583	724	703	724	724	308	549	730	717	666
16.6.2006	925	940	923	523	382	724	905	563	724	703	764	744	372	543	730	737	670

F3/022/H

Kutistumakokeiden tulokset

85% RH	Paino [g]			Kutistuma									Aika	Keskiarvo			
9.6.2005	Kpl 16	Kpl 17	Kpl 18	Kpl 16			Kpl 17			Kpl 18			[d]	Kpl 16	Kpl 17	Kpl 18	Kaikki
10.6.2005	937,8	951,4	940,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
12.6.2005	939,2	952,9	941,8	985	985	925	925	985	965	1025	1005	503	3	965	958	844	922
13.6.2005	941,0	954,4	943,2	1146	1085	1085	1065	1126	1045	1106	1126	703	4	1106	1079	978	1054
15.6.2005	941,8	955,3	944,1	1085	1065	1045	1005	1085	1045	1045	1106	724	6	1065	1045	958	1023
16.6.2005	925,9	946,6	926,6	1065	1085	1045	1025	1085	1045	1025	1106	703	7	1065	1052	945	1021
17.6.2005	925	945	926	1045	1045	1045	985	1065	1005	1025	1085	703	8	1045	1018	938	1001
18.6.2005	925	945	926	1045	1025	1025	985	1045	985	1005	1065	683	9	1032	1005	918	985
20.6.2005	925	945	926	1045	965	1025	945	985	925	945	1045	663	11	1012	951	884	949
21.6.2005	925	945	926	1025	965	1025	925	1005	945	945	1045	643	12	1005	958	878	947
22.6.2005	925	945	926	965	985	925	925	1025	905	925	1025	663	13	958	951	871	927
23.6.2005	925	945	926	965	985	1005	925	1005	925	925	1025	663	14	985	951	871	936
24.6.2005	925	945	926	965	965	985	905	1005	925	925	1005	643	15	972	945	858	925
27.6.2005	924	945	925	945	945	965	925	985	884	905	985	643	18	951	931	844	909
1.7.2005	924	945	925	884	884	925	864	925	824	844	905	603	22	898	871	784	851
5.7.2005	926	946	926	824	844	905	824	864	784	804	884	583	26	858	824	757	813
8.7.2005	926	946	926	764	764	784	744	784	704	724	784	523	29	771	744	677	730
15.7.2005	926	946	927	744	764	804	744	784	683	703	784	482	36	771	737	657	721
21.7.2005	926	946	927	663	703	744	623	744	663	663	703	442	42	704	677	603	661
9.8.2005	926	946	926	663	683	724	663	724	663	643	724	422	61	690	683	596	657
16.8.2005				643	643	704	663	724	663	623	703	422	68	663	683	583	643
24.8.2005				683	623	663	643	703	643	583	703	422	76	657	663	570	630
31.8.2005	925	947	927	623	623	643	583	683	623	563	663	402	83	630	630	543	601
7.9.2005				663	643	643	583	683	623	543	663	422	90	650	630	543	607
15.9.2005				643	603	623	563	663	603	563	663	402	98	623	610	543	592
28.9.2005	926	947	927	603	583	543	543	643	583	482	623	362	111	576	590	489	552
26.10.2005				563	543	543	523	583	503	462	563	322	139	549	536	449	511
24.11.2005	926	947	928	543	563	523	523	583	523	482	623	342	168	543	543	482	523
27.2.2006				583	583	523	523	643	523	503	643	362	263	563	563	503	543
18.4.2006				563	543	503	503	583	503	503	603	301	313	536	529	469	511
16.6.2006	926	946	926	563	563	503	543	623	523	503	603	301	372	543	563	469	525

F3/022/H

Virumakokeiden tulokset

65% RH	Paino	Viruma+kutistuma									Aika	Keskiarvo: vir+kut				Kutistuma	VIRUMA
16.6.2005	kg	Kpl 4			Kpl 5			Kpl 6			d	Kpl 4	Kpl 5	Kpl 6	Kaikki	Kaikki	Kaikki
16.6.2005		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16.6.2005	44,090	1528	1487	1327	1508	1467	1347	1307	1367	1487	0	1447	1441	1387	1425	916	509
16.6.2005		1548	1487	1367	1528	1447	1367	1407	1327	1608	0	1467	1447	1447	1454	916	538
17.6.2005	44,089	1648	1528	1447	1628	1447	1528	1427	1367	1709	1	1541	1534	1501	1525	902	623
18.6.2005	44,089	1588	1487	1568	1548	1447	1648	1387	1367	1809	2	1548	1548	1521	1539	913	625
20.6.2005	44,089	1588	1548	1608	1548	1487	1688	1387	1367	1849	4	1581	1575	1534	1563	898	666
21.6.2005	44,089	1588	1568	1628	1548	1487	1709	1387	1367	1849	5	1595	1581	1534	1570	893	677
22.6.2005		1608	1588	1628	1548	1487	1729	1407	1367	1869	6	1608	1588	1548	1581	867	715
23.6.2005	44,089	1608	1588	1648	1568	1508	1729	1407	1367	1889	7	1615	1601	1554	1590	891	699
24.6.2005		1548	1528	1769	1427	1427	1910	1286	1286	2050	8	1615	1588	1541	1581	849	733
27.6.2005	44,089	1588	1528	1789	1467	1407	1950	1327	1206	2030	11	1635	1608	1521	1588	784	804
1.7.2005		1548	1467	1729	1467	1367	1930	1286	1166	2050	15	1581	1588	1501	1557	817	739
5.7.2005	44,088	1568	1487	1769	1407	1387	1930	1286	1206	2030	19	1608	1575	1508	1563	813	750
8.7.2005		1508	1467	1769	1367	1327	1869	1186	1085	2010	22	1581	1521	1427	1510	744	766
15.7.2005	44,089	1508	1487	1749	1327	1367	1889	1226	1106	1990	29	1581	1528	1441	1516	773	744
21.7.2005		1528	1487	1729	1367	1347	1910	1266	1206	2050	35	1581	1541	1508	1543	737	806
8.8.2005	44,090	1628	1608	1950	1467	1508	2131	1226	1286	2251	53	1729	1702	1588	1673	708	965
15.8.2005		1588	1628	1930	1427	1508	2050	1226	1266	2231	60	1715	1662	1575	1650	737	913
23.8.2005		1588	1568	1889	1347	1447	2090	1186	1226	2191	68	1682	1628	1534	1615	715	900
30.8.2005	44,090	1568	1548	1849	1387	1407	2010	1146	1126	2111	75	1655	1601	1461	1572	699	873
6.9.2005		1628	1508	1789	1367	1367	2010	1166	1106	2090	82	1642	1581	1454	1559	679	880
14.9.2005		1668	1568	1849	1367	1387	2050	1206	1166	2131	90	1695	1601	1501	1599	666	934
27.9.2005	44,088	1688	1568	1930	1427	1447	2151	1286	1226	2211	103	1729	1675	1575	1659	663	996
18.10.2005		1648	1588	1849	1447	1387	2131	1327	1206	2191	124	1695	1655	1575	1642	650	992
17.11.2005	44,089	1668	1528	1889	1407	1407	2111	1286	1246	2251	154	1695	1642	1595	1644	670	974
12.1.2006		1729	1528	1869	1467	1467	2171	1307	1246	2211	210	1709	1702	1588	1666	668	998
5.4.2006		1789	1668	2111	1528	1668	2332	1367	1387	2372	293	1856	1843	1709	1802	666	1137
16.6.2006	44,087	1849	1668	2131	1608	1608	2372	1467	1407	2412	365	1883	1863	1762	1836	670	1166

F3/022/H

Virumakokeiden tulokset

85% RH	Paino	Viruma+kutistuma									Aika	Keskiarvo: vir+kut				Kutistuma	VIRUMA
16.6.2005	kg	Kpl 1			Kpl 2			Kpl 3			d	Kpl 1	Kpl 2	Kpl 3	Kaikki	Kaikki	Kaikki
16.6.2005		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16.6.2005	44,059	1447	1608	1528	1427	1467	1447	1387	1487	1548	0	1528	1447	1474	1483	1021	462
16.6.2005		1467	1548	1528	1447	1508	1508	1467	1548	1568	0	1514	1487	1528	1510	1021	489
17.6.2005	44,062	1447	1588	1648	1407	1528	1648	1447	1528	1729	1	1561	1528	1568	1552	1001	552
18.6.2005	44,062	1447	1588	1688	1407	1508	1668	1447	1528	1709	2	1575	1528	1561	1554	985	570
20.6.2005	44,062	1467	1588	1688	1407	1508	1668	1467	1528	1709	4	1581	1528	1568	1559	949	610
21.6.2005	44,062	1447	1608	1688	1407	1528	1648	1447	1508	1749	5	1581	1528	1568	1559	947	612
22.6.2005	44,062	1447	1588	1668	1387	1487	1628	1447	1528	1709	6	1568	1501	1561	1543	927	616
23.6.2005	44,062	1508	1648	1668	1467	1548	1608	1487	1568	1709	7	1608	1541	1588	1579	936	643
24.6.2005		1508	1648	1668	1487	1548	1628	1528	1608	1709	8	1608	1554	1615	1592	925	668
27.6.2005	44,064	1548	1628	1628	1487	1508	1648	1548	1568	1729	11	1601	1548	1615	1588	909	679
1.7.2005		1528	1628	1668	1487	1528	1648	1528	1568	1709	15	1608	1554	1601	1588	851	737
5.7.2005	44,064	1467	1588	1648	1427	1467	1588	1487	1508	1668	19	1568	1494	1554	1539	813	726
8.7.2005		1447	1568	1608	1407	1447	1568	1467	1487	1588	22	1541	1474	1514	1510	730	779
15.7.2005	44,062	1467	1548	1648	1387	1467	1568	1407	1528	1648	29	1554	1474	1528	1519	721	797
21.7.2005		1407	1528	1608	1327	1407	1568	1387	1528	1648	35	1514	1434	1521	1490	661	829
9.8.2005	44,064	1447	1588	1648	1387	1447	1508	1407	1548	1608	54	1561	1447	1521	1510	657	853
16.8.2005		1447	1568	1709	1367	1427	1548	1307	1568	1608	61	1575	1447	1494	1505	643	862
24.8.2005		1447	1528	1688	1347	1387	1568	1206	1447	1568	69	1554	1434	1407	1465	630	835
31.8.2005	44,063	1367	1568	1709	1286	1367	1548	1166	1508	1608	76	1548	1400	1427	1458	601	858
7.9.2005		1467	1568	1688	1347	1347	1548	1246	1447	1548	83	1575	1414	1414	1467	607	860
15.9.2005		1387	1568	1628	1327	1347	1568	1206	1447	1548	91	1528	1414	1400	1447	592	855
28.9.2005	44,063	1467	1588	1688	1367	1427	1628	1327	1487	1608	104	1581	1474	1474	1510	552	958
26.10.2005		1407	1528	1668	1286	1367	1548	1266	1427	1568	132	1534	1400	1420	1452	511	940
5.12.2005	44,065	1166	1327	1608	1206	1126	1528	1166	1166	1447	172	1367	1286	1260	1304	523	782
26.1.2006		1246	1508	1688	1206	1307	1608	1347	1347	1568	224	1481	1374	1420	1425	543	882
18.4.2006		1367	1628	1769	1387	1407	1709	1387	1467	1688	306	1588	1501	1514	1534	511	1023
16.6.2006	44,065	1407	1688	1829	1427	1467	1789	1467	1528	1729	365	1642	1561	1575	1592	525	1068

F26/026/SAP/N

Kutistumakokeiden tulokset

65% RH	Paino [g]			Kutistuma									Aika	Keskiarvo			
13.6.2005	Kpl 19	Kpl 20	Kpl 21	Kpl 19			Kpl 20			Kpl 21			[d]	Kpl 19	Kpl 20	Kpl 21	Kaikki
14.6.2005	911,3	910,1	920,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
15.6.2005	916,0	913,5	924,9	-40	-60	20	101	60	40	40	-20	60	2	-27	67	27	22
16.6.2005	916,4	914,8	925,4	-40	-20	60	141	80	80	141	40	121	3	0	101	101	67
17.6.2005	890,9	901,2	911,1	20	0	101	121	80	121	181	60	141	4	40	107	127	92
18.6.2005	891,5	902,0	911,8	20	-40	121	161	60	101	161	40	141	5	33	107	114	85
20.6.2005	891	901	911	60	40	161	201	141	181	181	80	201	7	87	174	154	138
21.6.2005	890	900	911	161	181	241	241	201	281	322	241	281	8	194	241	281	239
22.6.2005	890	900	911	181	181	261	301	261	322	322	261	281	9	208	295	288	264
23.6.2005	889	900	910	221	281	302	362	301	302	362	342	322	10	268	322	342	310
24.6.2005	889	900	910	241	281	322	342	342	362	442	362	402	11	281	348	402	344
26.6.2005	889	900	909	261	362	322	402	382	462	503	422	422	13	315	415	449	393
27.6.2005	889	900	909	281	382	382	402	382	442	543	342	482	14	348	409	456	404
28.6.2005	889	899	909	322	402	402	442	442	482	543	462	503	15	375	456	502	444
29.6.2005	889	899	909	322	402	402	382	442	482	543	462	503	16	375	436	502	438
30.6.2005	889	899	909	322	382	382	422	442	462	563	422	503	17	362	442	496	433
1.7.2005	889	899	909	362	402	442	362	442	482	563	442	523	18	402	429	509	447
5.7.2005	889	898	908	382	442	482	382	503	523	543	523	523	22	436	469	529	478
8.7.2005	889	898	908	382	442	442	342	482	503	543	482	482	25	422	442	503	456
15.7.2005	889	899	909	362	462	523	422	482	563	563	503	563	32	449	489	543	494
21.7.2005	889	899	909	482	523	563	543	482	603	683	583	563	38	523	543	610	558
29.7.2005	889	899	909	503	583	523	583	563	603	703	563	583	46	536	583	616	578
8.8.2005	888	898	908	442	563	543	563	563	603	683	563	563	56	516	576	603	565
15.8.2005				503	543	563	543	482	603	703	583	583	63	536	543	623	567
23.8.2005				482	523	583	543	482	603	683	603	583	71	529	543	623	565
30.8.2005	888	898	908	462	503	603	543	563	603	683	603	563	78	523	570	616	570
6.9.2005				442	563	583	583	482	623	703	603	583	85	529	563	630	574
14.9.2005				482	563	603	603	503	603	703	583	563	93	549	570	616	578
27.9.2005	886	896	906	503	563	603	583	563	603	724	583	583	106	556	583	630	590
17.10.2005				523	603	583	623	583	683	744	603	623	126	570	630	657	619
18.11.2005	886	897	907	563	683	663	663	583	663	716	623	663	158	637	637	667	647
9.2.2006				623	744	724	643	683	744	844	724	724	241	697	690	764	717
13.4.2006				623	643	663	663	724	764	884	744	784	304	643	717	804	721
20.6.2006	886	895	906	683	784	744	703	724	764	884	744	764	372	737	730	797	755

F26/026/SAP/N

Kutistumakokeiden tulokset

85% RH	Paino [g]			Kutistuma									Aika	Keskiarvo			
13.6.2005	Kpl 22	Kpl 23	Kpl 24	Kpl 22			Kpl 23			Kpl 24			[d]	Kpl 22	Kpl 23	Kpl 24	Kaikki
14.6.2005	915,1	938,1	913,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
15.6.2005	918,3	941,5	916,6	20	40	40	80	-60	121	80	20	-20	2	33	47	27	36
16.6.2005	919,4	942,2	917,3	80	80	101	121	20	121	121	40	60	3	87	87	74	83
17.6.2005	907,4	927,2	897,4	40	121	121	80	0	141	121	80	80	4	94	74	94	87
18.6.2005	907,7	927,7	897,7	101	141	161	141	0	141	40	121	101	5	134	94	87	105
20.6.2005	908	927	899	141	181	161	181	80	161	181	121	121	7	161	141	141	147
21.6.2005	908	927	897	261	241	241	181	201	241	281	181	221	8	248	208	228	228
22.6.2005	908	927	897	281	221	241	201	201	241	302	181	221	9	248	214	235	232
23.6.2005	907	926	898	281	281	281	302	261	281	302	241	281	10	281	281	275	279
24.6.2005	907	926	898	322	322	261	261	221	281	322	201	301	11	302	255	275	277
26.6.2005	907	926	896	261	302	322	362	302	281	362	281	322	13	295	315	322	310
27.6.2005	907	926	896	382	362	342	382	342	342	422	301	342	14	362	355	355	357
28.6.2005	906	926	897	382	322	342	382	322	322	422	322	362	15	348	342	369	353
29.6.2005	906	926	897	402	342	362	382	322	342	402	322	362	16	368	348	362	360
30.6.2005	906	926	897	422	322	382	382	302	322	422	322	362	17	375	335	369	360
1.7.2005	906	926	897	402	362	402	402	322	301	402	322	362	18	389	342	362	364
5.7.2005	907	926	897	382	402	382	422	342	322	402	322	382	22	389	362	369	373
8.7.2005	907	926	897	382	362	382	422	322	342	402	322	362	25	375	362	362	366
15.7.2005	907	926	897	442	362	442	422	362	362	342	322	402	32	415	382	355	384
21.7.2005	907	926	897	442	402	422	462	362	362	422	402	422	38	422	395	415	411
29.7.2005	907	926	897	503	442	482	523	422	422	503	442	422	46	476	456	456	462
9.8.2005	907	926	897	482	402	462	482	382	362	482	422	462	57	449	409	456	438
16.8.2005				503	422	482	482	382	382	482	422	442	64	469	415	449	444
24.8.2005				462	402	422	503	382	402	503	402	442	72	429	429	449	436
31.8.2005	906	925	896	422	402	442	462	362	362	422	382	362	79	422	395	389	402
7.9.2005				462	402	442	462	382	382	442	362	382	86	436	409	395	413
15.9.2005				462	402	462	462	362	362	442	382	382	94	442	395	402	413
28.9.2005	907	925	896	442	382	422	462	362	362	442	382	382	107	415	395	402	404
26.10.2005				442	382	402	422	342	301	422	342	322	135	409	355	362	375
24.11.2005	908	926	897	523	442	402	523	462	422	543	462	482	164	456	469	496	473
27.2.2006				482	482	462	523	402	442	543	482	442	259	476	456	489	473
18.4.2006				462	503	482	523	442	402	543	442	402	309	482	456	462	467
20.6.2006	907	926	897	503	503	503	563	482	422	523	442	442	372	503	489	469	487

F26/026/SAP/N

Virumakokeiden tulokset

65% RH	Paino	Viruma+kutistuma									Aika	Keskiarvo: vir+kut				Kutistuma	VIRUMA
	kg	Kpl 10			Kpl 11			Kpl 12			d	Kpl 10	Kpl 11	Kpl 12	Kaikki	Kaikki	Kaikki
20.6.2005		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.6.2005	44,422	1146	3357	1146	1327	1387	1005	1166	1427	1085	0,04	1883	1240	1226	1449	138	1311
20.6.2005		1186	3477	1266	1387	1467	1126	1085	1548	1206	0,13	1977	1327	1280	1528	138	1390
21.6.2005	44,419	1467	3739	1628	1648	1769	1427	1387	1910	1548	1	2278	1615	1615	1836	239	1597
22.6.2005	44,419	1668	3859	1749	1869	1970	1487	1548	2151	1608	2	2425	1776	1769	1990	264	1726
23.6.2005	44,419	1829	4020	1849	2050	2171	1528	1709	2352	1668	3	2566	1916	1910	2131	310	1820
24.6.2005		1950	4181	1889	2211	2332	1528	1869	2513	1668	4	2673	2023	2017	2238	344	1894
26.6.2005	44,417	2070	4342	2030	2352	2492	1528	2010	2734	1668	6	2814	2124	2137	2358	393	1965
27.6.2005	44,418	2111	4362	2070	2412	2533	1608	2070	2774	1688	7	2848	2184	2178	2403	404	1999
28.6.2005		2171	4402	2090	2492	2533	1628	2070	2794	1688	8	2888	2218	2184	2430	444	1985
29.6.2005		2211	4442	2131	2492	2513	1648	2090	2834	1709	9	2928	2218	2211	2452	438	2014
30.6.2005		2251	4482	2151	2553	2573	1648	2151	2894	1749	10	2961	2258	2265	2495	433	2061
1.7.2005		2271	4523	2171	2573	2553	1668	2191	2955	1769	11	2988	2265	2305	2519	447	2073
5.7.2005	44,414	2352	4623	2231	2633	2653	1749	2251	3035	1809	15	3069	2345	2365	2593	478	2115
8.7.2005	44,415	2412	4683	2291	2714	2734	1849	2312	3116	1950	18	3129	2432	2459	2673	456	2218
15.7.2005	44,415	2513	4884	2452	2935	2955	1990	2492	3317	2111	25	3283	2626	2640	2850	494	2356
21.7.2005		2613	5025	2573	3055	3035	2070	2653	3317	2211	31	3404	2720	2727	2950	558	2392
29.7.2005		2754	5146	2693	3095	3156	2171	2754	3437	2332	39	3531	2807	2841	3060	578	2481
8.8.2005	44,412	2774	5286	2754	3216	3276	2231	2814	3437	2372	49	3605	2908	2874	3129	565	2564
15.8.2005		2834	5306	2794	3296	3276	2251	2874	3497	2452	56	3645	2941	2941	3176	567	2609
23.8.2005		2794	5327	2714	3256	3216	2291	2834	3437	2392	64	3611	2921	2888	3140	565	2575
30.8.2005	44,412	2834	5327	2794	3256	3136	2251	2874	3417	2452	71	3652	2881	2915	3149	570	2580
6.9.2005		2834	5387	2874	3276	3156	2291	2915	3457	2472	78	3698	2908	2948	3185	574	2611
14.9.2005		2834	5407	2874	3296	3176	2291	2874	3417	2573	86	3705	2921	2955	3194	578	2615
27.9.2005	44,411	2995	5467	3035	3377	3216	2452	2935	3457	2653	99	3832	3015	3015	3287	590	2698
17.10.2005		2955	5467	2975	3317	3236	2392	2834	3477	2653	119	3799	2982	2988	3256	619	2638
17.11.2005	44,408	2995	5528	3015	3417	1266	2553	2935	3598	2714	150	3846	2412	3082	3113	647	2466
12.1.2006		3116	5568	3095	3518	1367	2533	3055	3598	2834	206	3926	2472	3162	3187	717	2470
5.4.2006		3317	5829	3357	3719	1528	2714	3236	3819	3075	289	4167	2653	3377	3399	721	2678
20.6.2006	44,405	3397	5889	3457	3779	1608	2874	3357	3899	3176	365	4248	2754	3477	3493	755	2738

85% RH	Paino	Viruma+kutistuma									Aika	Keskiarvo: vir+kut				Kutistuma	VIRUMA
20.6.2005	kg	Kpl 7			Kpl 8			Kpl 9			d	Kpl 7	Kpl 8	Kpl 9	Kaikki	Kaikki	Kaikki
20.6.2005		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.6.2005	43,913	1427	1025	1166	1286	1286	1045	1407	1005	1106	0,04	1206	1206	1173	1195	147	1048
20.6.2005		1528	1186	1307	1387	1508	1106	1568	1186	1146	0,21	1340	1333	1300	1324	147	1177
21.6.2005	43,912	1749	1447	1467	1668	1829	1226	1869	1447	1246	1	1554	1575	1521	1550	228	1322
22.6.2005	43,910	1910	1628	1688	1910	1950	1387	2171	1467	1427	2	1742	1749	1688	1726	232	1494
23.6.2005	43,910	2050	1688	1829	2010	2010	1548	2332	1548	1608	3	1856	1856	1829	1847	279	1568
24.6.2005		2090	1769	1889	2070	2090	1608	2412	1568	1688	4	1916	1923	1889	1910	277	1633
26.6.2005	43,910	2231	1990	2090	2271	2251	1849	2653	1648	1930	6	2104	2124	2077	2102	310	1791
27.6.2005	43,911	2332	2010	2151	2332	2271	1910	2714	1648	1990	7	2164	2171	2117	2151	357	1793
28.6.2005		2372	2010	2171	2372	2251	1950	2754	1588	2030	8	2184	2191	2124	2166	353	1813
29.6.2005		2392	2050	2231	2372	2271	2010	2794	1628	2090	9	2224	2218	2171	2204	360	1845
30.6.2005		2392	2090	2271	2392	2312	2030	2834	1608	2131	10	2251	2245	2191	2229	360	1869
1.7.2005		2432	2070	2312	2452	2332	2070	2874	1648	2171	11	2271	2285	2231	2262	364	1898
5.7.2005		2553	2211	2492	2533	2432	2332	2955	1709	2412	15	2419	2432	2358	2403	373	2030
8.7.2005	43,910	2553	2251	2492	2553	2472	2332	2975	1769	2432	18	2432	2452	2392	2425	366	2059
15.7.2005	43,910	2653	2332	2593	2613	2593	2452	3075	1769	2513	25	2526	2553	2452	2510	384	2126
21.7.2005		2673	2352	2633	2553	2693	2533	3095	1910	2693	31	2553	2593	2566	2571	411	2160
29.7.2005		2794	2472	2714	2593	2774	2593	3156	1930	2754	39	2660	2653	2613	2642	462	2180
9.8.2005	43,911	2975	2653	2593	2854	2834	2693	3357	1990	2894	50	2740	2794	2747	2760	438	2323
16.8.2005		2995	2613	2774	2774	2874	2693	3317	2010	2975	57	2794	2781	2767	2781	444	2336
24.8.2005		2995	2693	3196	2633	2613	3035	3196	2352	3216	65	2961	2760	2921	2881	436	2446
31.8.2005	43,911	2995	2794	3216	2573	3116	3035	3216	2291	3216	72	3002	2908	2908	2939	402	2537
7.9.2005		3015	2854	3216	2633	3156	3075	3256	2312	3216	79	3028	2955	2928	2970	413	2557
15.9.2005		3015	2874	3276	2593	3196	3095	3236	2332	3256	87	3055	2961	2941	2986	413	2573
28.9.2005	43,910	3095	2854	3296	2754	3236	3116	3377	2392	3276	100	3082	3035	3015	3044	404	2640
27.10.2005		3035	2814	3417	2633	3156	3176	3216	2372	3276	129	3089	2988	2955	3011	375	2635
5.12.2005	43,912	2894	2734	3216	2352	3136	3055	2915	2452	3156	168	2948	2848	2841	2879	473	2405
26.1.2006		2874	2754	3337	2472	3296	3156	3035	2573	3296	220	2988	2975	2968	2977	473	2504
18.4.2006		3035	3015	3417	2653	3558	3236	3256	2673	3296	302	3156	3149	3075	3127	467	2660
20.6.2006	43,910	3116	2995	3497	2714	3618	3276	3337	2714	3417	365	3203	3203	3156	3187	487	2700

F26/026/SAP/H

Kutistumakokeiden tulokset

65% RH	Paino [g]			Kutistuma									Aika	Keskiarvo			
13.6.2005	Kpl 13	Kpl 14	Kpl 15	Kpl 13			Kpl 14			Kpl 15			[d]	Kpl 13	Kpl 14	Kpl 15	Kaikki
14.6.2005	920,2	905,5	902,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
16.6.2005	921,6	906,7	903,6	482	543	623	683	281	342	-	-	-	3	549	436	-	492
17.6.2005	921,9	907,2	903,9	724	844	864	965	623	643	824	824	824	4	811	744	824	793
18.6.2005	900,3	884,7	886,3	703	804	824	1005	583	603	824	764	764	5	777	730	784	764
20.6.2005	899	884	887	724	784	784	884	563	503	764	663	703	7	764	650	710	708
21.6.2005	900	884	886	683	724	784	905	523	523	784	703	744	8	730	650	744	708
22.6.2005	900	884	886	683	724	784	925	563	543	824	703	724	9	730	677	750	719
23.6.2005	900	884	886	623	764	784	945	543	563	844	683	724	10	724	683	750	719
24.6.2005	900	884	886	603	724	764	905	543	503	824	683	703	11	697	650	737	695
26.6.2005	900	884	885	623	703	744	884	523	503	824	703	744	13	690	637	757	695
27.6.2005	900	884	885	603	543	663	844	482	422	724	703	724	14	603	583	717	634
28.6.2005	899	883	885	603	683	724	844	523	462	804	683	703	15	670	610	730	670
29.6.2005	899	883	885	583	643	704	844	482	402	764	663	703	16	643	576	710	643
30.6.2005	899	883	885	623	663	724	844	482	422	744	643	724	17	670	583	704	652
1.7.2005	899	883	885	603	643	724	844	482	402	744	643	724	18	657	576	704	645
5.7.2005	899	883	884	583	663	704	824	482	362	724	623	724	22	650	556	690	632
8.7.2005	899	883	884	543	563	643	804	462	362	704	623	703	25	583	543	677	601
15.7.2005	900	884	885	583	623	603	784	442	322	724	603	724	32	603	516	683	601
21.7.2005	900	884	885	523	643	683	764	482	362	704	603	703	38	616	536	670	607
29.7.2005	900	884	885	563	663	683	824	482	422	744	663	724	46	637	576	710	641
8.8.2005	899	883	885	603	623	683	784	482	422	724	603	683	56	637	563	670	623
15.8.2005				563	663	683	784	523	422	764	603	724	63	637	576	697	637
23.8.2005				563	643	663	724	462	422	724	603	683	71	623	536	670	610
30.8.2005	899	883	885	523	623	643	744	462	422	724	583	643	78	596	543	650	596
6.9.2005				563	643	663	744	482	422	704	603	663	85	623	549	657	610
14.9.2005				543	623	683	724	482	442	724	603	663	93	616	549	663	610
27.9.2005	898	882	883	563	603	683	744	462	422	704	643	683	106	616	543	677	612
17.10.2005				563	643	683	724	482	442	764	643	663	126	630	549	690	623
18.11.2005	899	883	885	543	623	724	764	523	422	784	683	724	158	630	570	730	643
9.2.2006				543	643	724	784	583	462	824	703	744	241	637	610	757	668
13.4.2006				643	663	764	784	603	503	764	703	764	304	690	630	744	688
20.6.2006	898	882	884	663	764	764	804	623	482	824	683	764	372	730	637	757	708

F26/026/SAP/H

Kutistumakokeiden tulokset

85% RH	Paino [g]			Kutistuma									Aika	Keskiarvo			
13.6.2005	Kpl 16	Kpl 17	Kpl 18	Kpl 16			Kpl 17			Kpl 18			[d]	Kpl 16	Kpl 17	Kpl 18	Kaikki
14.6.2005	911,5	910,0	911,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
16.6.2005	912,6	910,7	911,8	121	864	442	402	422	603	462	523	583	3	476	476	523	491
17.6.2005	912,7	910,9	912,1	663	1065	884	663	703	905	744	744	824	4	871	757	771	800
18.6.2005	882,1	888,5	888,6	663	905	744	643	683	864	744	804	844	5	771	730	797	766
20.6.2005	882	887	888	643	925	543	523	623	764	704	724	804	7	704	637	744	695
21.6.2005	882	888	888	643	925	543	523	603	784	704	724	784	8	704	637	737	692
22.6.2005	882	888	888	583	905		543	643	744	704	703	784	9	744	643	730	706
23.6.2005	881	888	889	643	965		543	643	784	704	703	784	10	804	657	730	730
24.6.2005	881	888	889	663	965		482	583	744	704	724	784	11	814	603	737	718
26.6.2005	880	887	888	643	884		543	603	704	663	663	663	13	764	616	663	681
27.6.2005	880	887	888	643	925		462	583	683	663	683	724	14	784	576	690	683
28.6.2005	880	887	888	603	925		482	603	724	663	663	703	15	764	603	677	681
29.6.2005	880	887	888	543	925		422	563	683	643	663	703	16	734	556	670	653
30.6.2005	880	887	888	523	905		442	563	683	623	663	703	17	714	563	663	647
1.7.2005	880	887	888	503	905		301	583	704	643	663	703	18	704	529	670	634
5.7.2005	880	887	888	543	884		322	523	663	623	643	683	22	714	502	650	622
8.7.2005	880	887	888	482	764		201	442	583	543	563	603	25	623	409	570	534
15.7.2005	881	888	888	523	804		261	462	563	583	583	603	32	663	429	590	561
21.7.2005	881	888	888	382	784		201	342	563	543	503	503	38	583	369	516	489
29.7.2005	881	888	888	523	824		221	442	603	563	583	583	46	673	422	576	557
9.8.2005	881	887	888	462	804		221	382	563	523	543	603	57	633	389	556	526
16.8.2005				482	804		221	382	583	543	543	603	64	643	395	563	534
24.8.2005				462	804		201	382	583	543	543	543	72	633	389	543	521
31.8.2005	881	888	889	402	744		201	301	563	503	462	523	79	573	355	496	475
7.9.2005				382	784		221	342	563	523	482	543	86	583	375	516	491
15.9.2005				402	764		201	322	543	503	503	523	94	583	355	509	482
28.9.2005	880	887	888	342	724		161	281	503	503	462	503	107	533	315	489	446
26.10.2005				342	704		141	281	482	462	442	482	135	523	302	462	429
24.11.2005	880	888	887	362	784		241	382	482	462	503	503	164	573	368	489	477
27.2.2006				402	764		241	422	563	503	523	543	259	583	409	523	505
18.4.2006				362	704		241	402	543	523	503	583	309	533	395	536	488
20.6.2006	880	888	888	362	724		241	442	583	523	543	563	372	543	422	543	503

Lite 9b

F26/026/SAP/H

Virumakokeiden tulokset

65% RH	Paino	Viruma+kutistuma									Aika	Keskiarvo: vir+kut				Kutistuma	VIRUMA
	kg	Kpl 4			Kpl 5			Kpl 6			d	Kpl 4	Kpl 5	Kpl 6	Kaikki	Kaikki	Kaikki
20.6.2005		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.6.2005	44,312	1327	1367	1628	1528	1166	1528	1367	1286	1548	0,04	1441	1407	1400	1416	708	708
20.6.2005		1327	1387	1628	1548	1206	1548	1387	1307	1568	0,06	1447	1434	1420	1434	708	726
21.6.2005	44,312	1407	1427	1729	1628	1226	1628	1447	1367	1608	1	1521	1494	1474	1496	708	788
22.6.2005	44,311	1387	1407	1709	1608	1226	1648	1427	1347	1608	2	1501	1494	1461	1485	719	766
23.6.2005	44,311	1447	1427	1729	1648	1226	1688	1467	1347	1648	3	1534	1521	1487	1514	719	795
24.6.2005		1467	1467	1749	1709	1246	1709	1528	1367	1668	4	1561	1554	1521	1545	695	851
26.6.2005	44,311	1508	1447	1749	1729	1226	1709	1528	1246	1668	6	1568	1554	1481	1534	695	840
27.6.2005	44,311	1467	1447	1749	1688	1246	1668	1487	1286	1588	7	1554	1534	1454	1514	634	880
28.6.2005		1467	1447	1749	1668	1246	1668	1467	1327	1608	8	1554	1528	1467	1516	670	846
29.6.2005		1487	1447	1789	1709	1246	1688	1467	1347	1608	9	1575	1548	1474	1532	643	889
30.6.2005		1447	1427	1729	1668	1226	1648	1447	1307	1548	10	1534	1514	1434	1494	652	842
1.7.2005		1427	1427	1749	1668	1226	1668	1467	1307	1568	11	1534	1521	1447	1501	645	855
5.7.2005	44,311	1427	1407	1729	1668	1226	1648	1467	1307	1568	15	1521	1514	1447	1494	632	862
8.7.2005	44,311	1447	1387	1749	1688	1146	1729	1467	1266	1628	18	1528	1521	1454	1501	601	900
15.7.2005	44,310	1628	1427	1869	1849	1146	1869	1568	1246	1789	25	1642	1621	1534	1599	601	998
21.7.2005		1688	1467	1990	1889	1226	1910	1648	1347	1869	31	1715	1675	1621	1671	607	1063
29.7.2005		1688	1508	1930	1950	1226	1930	1568	1286	1809	39	1709	1702	1554	1655	641	1014
8.8.2005	44,310	1729	1487	1950	1950	1206	1970	1628	1367	1930	49	1722	1709	1642	1691	623	1068
15.8.2005		1709	1528	2010	1930	1286	2050	1628	1387	1950	56	1749	1755	1655	1720	637	1083
23.8.2005		1688	1568	2050	1889	1266	2050	1548	1407	1910	64	1769	1735	1621	1709	610	1099
30.8.2005	44,309	1709	1568	2050	1889	1206	2050	1528	1286	1950	71	1776	1715	1588	1693	596	1097
6.9.2005		1729	1548	2090	1889	1166	2050	1528	1307	1990	78	1789	1702	1608	1700	610	1090
14.9.2005		1769	1568	2050	1930	1206	2070	1568	1347	1950	86	1796	1735	1621	1717	610	1108
27.9.2005	44,309	1809	1668	2211	1990	1246	2111	1548	1407	2030	99	1896	1782	1662	1780	612	1168
17.10.2005		1749	1668	2151	1889	1246	2070	1427	1347	1990	119	1856	1735	1588	1726	623	1103
17.11.2005	44,308	1749	1668	2231	1910	1266	2090	1427	1467	2010	150	1883	1755	1635	1758	643	1114
12.1.2006		1869	1729	2251	2010	1367	2131	1528	1548	2151	206	1950	1836	1742	1843	668	1175
5.4.2006		1950	1910	2372	2131	1487	2392	1709	1588	2231	289	2077	2003	1843	1974	688	1286
20.6.2006	44,305	2030	1990	2452	2191	1568	2492	1809	1588	2372	365	2157	2084	1923	2055	708	1347

F26/026/SAP/H

Virumakokeiden tulokset

85% RH	Paino	Viruma+kutistuma									Aika	Keskiarvo: vir+kut				Kutistuma	VIRUMA
20.6.2005	kg	Kpl 1			Kpl 2			Kpl 3			d	Kpl 1	Kpl 2	Kpl 3	Kaikki	Kaikki	Kaikki
20.6.2005		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.6.2005	43,848	1186	1166	1709	1849	181	2090	1970	181	2010	0,04	1353	1374	1387	1371	695	677
20.6.2005		1286	1166	1789	1930	181	2211	2030	241	2090	0,17	1414	1441	1454	1436	695	741
21.6.2005	43,847	1307	1246	1889	1970	241	2271	2050	302	2151	1	1481	1494	1501	1492	692	800
22.6.2005	43,848	1266	1246	1889	1930	241	2291	2010	302	2171	2	1467	1487	1494	1483	706	777
23.6.2005	43,849	1226	1307	1950	1889	261	2312	2010	362	2191	3	1494	1487	1521	1501	730	771
24.6.2005		1246	1327	1950	1930	281	2352	2030	382	2231	4	1508	1521	1548	1525	718	807
26.6.2005	43,848	1206	1347	1950	1889	281	2352	2010	382	2231	6	1501	1508	1541	1516	681	835
27.6.2005	43,848	1106	1286	1789	1809	181	2271	1910	261	2151	7	1394	1420	1441	1418	683	735
28.6.2005		1146	1307	1829	1829	181	2291	1869	221	2151	8	1427	1434	1414	1425	681	744
29.6.2005		1146	1327	1869	1849	201	2312	1869	241	2171	9	1447	1454	1427	1443	653	789
30.6.2005		1126	1307	1829	1829	181	2291	1889	221	2151	10	1420	1434	1420	1425	647	778
1.7.2005		1126	1327	1829	1849	201	2291	1889	201	2151	11	1427	1447	1414	1429	634	795
5.7.2005		1106	1307	1809	1809	161	2291	1869	181	2171	15	1407	1420	1407	1411	622	789
8.7.2005	43,849	1065	1266	1889	1769	101	2231	1829	121	2090	18	1407	1367	1347	1374	534	840
15.7.2005	43,849	1266	1065	2090	2030	-80	2432	2050	121	2211	25	1474	1461	1461	1465	561	905
21.7.2005		1266	1106	2151	1970	-161	2492	2010	141	2211	31	1508	1434	1454	1465	489	976
29.7.2005		1327	1085	2191	2050	-80	2533	1990	181	2231	39	1534	1501	1467	1501	557	944
9.8.2005	43,849	1307	1146	2231	2090	-141	2553	2090	201	2271	50	1561	1501	1521	1528	526	1002
16.8.2005		1266	1065	2191	2010	-121	2533	2050	141	2231	57	1508	1474	1474	1485	534	951
24.8.2005		1186	1467	2191	1910	161	2573	1990	422	2251	65	1615	1548	1554	1572	521	1051
31.8.2005	43,848	1166	1427	2191	1809	141	2492	1849	322	2131	72	1595	1481	1434	1503	475	1028
7.9.2005		1186	1467	2211	1849	141	2492	1910	382	2151	79	1621	1494	1481	1532	491	1041
15.9.2005		1166	1427	2191	1869	141	2452	1849	362	2111	87	1595	1487	1441	1508	482	1025
28.9.2005	43,849	1226	1407	2231	1910	161	2513	1990	402	2171	100	1621	1528	1521	1557	446	1111
27.10.2005		1146	1467	2171	1910	141	2392	1910	402	2090	129	1595	1481	1467	1514	429	1085
5.12.2005	43,850	1186	1528	2151	1910	80	2533	2010	362	2211	168	1621	1508	1528	1552	477	1075
26.1.2006		1146	1548	2131	1930	141	2533	2030	402	2271	220	1608	1534	1568	1570	505	1065
18.4.2006		1206	1668	2291	1990	201	2714	2151	503	2312	302	1722	1635	1655	1671	488	1183
20.6.2006	43,850	1347	1769	2352	2050	241	2734	2211	603	2352	365	1822	1675	1722	1740	503	1237

Betonin F26/022 kutistumakoekappaleiden painojen muutokset
mittausjakson aikana

Hionnan vaikutus kappaleen painoon on eliminoitu taulukoista siten,
että painon muutos ennen ja jälkeen hionnan on merkitty samaksi.

F26/022/H RH 65 %				F26/022/H RH 85 %				F26/022/N RH 65 %				F26/022/N RH 85 %			
Aika [d]	Painon muutos [g]			Aika [d]	Painon muutos [g]			Aika [d]	Painon muutos [g]			Aika [d]	Painon muutos [g]		
	Kpl 13	Kpl 14	Kpl 15		Kpl 16	Kpl 17	Kpl 18		Kpl 19	Kpl 20	Kpl 21		Kpl 22	Kpl 23	Kpl 24
1	0,0	0,0	0,0	1	0,0	0,0	0,0	1	0,0	0,0	0,0	1	0,0	0,0	0,0
3	1,3	1,9	1,8	3	1,9	1,9	1,9	2	3,6	4,2	4,2	2	3,9	3,6	3,6
4	1,7	2,3	2,2	4	2,3	2,2	2,3	3	3,4	3,9	3,6	3	3,7	3,5	3,5
5	3,9	4,0	3,8	5	3,6	4,0	4,0	4	4,4	4,8	4,6	4	3,7	3,5	3,5
6	3,3	4,2	3,6	6	4,0	3,8	3,8	5	5,0	5,7	5,0	5	4,0	4,2	4,3
7	3,3	4,2	3,6	7	4,0	3,8	3,8	6	4,8	5,5	4,7	6	4,0	3,9	3,9
8	2,5	3,0	2,8	8	4,5	3,0	3,5	7	4,8	5,5	4,7	7	4,3	4,0	4,0
9	2,5	3,0	2,8	9	3,5	3,0	3,5	8	3,7	3,7	3,0	8	4,7	2,6	3,5
10	2,5	3,0	3,8	10	3,5	3,0	2,5	9	3,7	2,7	3,0	9	4,7	3,6	4,5
11	2,5	3,0	3,8	11	3,5	3,0	2,5	10	3,7	4,7	4,0	10	2,7	2,6	3,5
13	2,5	3,0	3,8	13	3,5	3,0	2,5	11	3,7	4,7	4,0	11	2,7	2,6	3,5
14	3,5	2,0	2,8	14	3,5	4,0	4,5	13	3,7	4,7	4,0	13	2,7	2,6	3,5
15	3,5	2,0	2,8	15	3,5	4,0	4,5	14	3,7	2,7	3,0	14	4,7	4,6	4,5
16	2,5	3,0	2,8	16	4,5	4,0	3,5	15	3,7	2,7	3,0	15	4,7	4,6	4,5
17	2,5	3,0	2,8	17	4,5	4,0	3,5	16	3,7	2,7	3,0	16	2,7	3,6	3,5
20	1,5	3,0	2,8	20	3,5	3,0	3,5	17	3,7	2,7	3,0	17	2,7	3,6	3,5
24	1,5	3,0	2,8	24	3,5	3,0	3,5	20	2,7	2,7	3,0	20	3,7	2,6	1,5
28	1,5	2,0	3,8	28	4,5	3,0	2,5	22	2,7	2,7	3,0	22	3,7	3,6	3,5
31	1,5	2,0	3,8	31	4,5	4,0	2,5	24	2,7	2,7	3,0	24	3,7	3,6	3,5
38	3,5	3,0	3,8	38	4,5	4,0	4,5	28	2,7	2,7	2,0	28	3,7	3,6	4,5
44	3,5	3,0	3,8	44	4,5	4,0	4,5	31	2,7	2,7	2,0	31	3,7	3,6	4,5
62	2,5	3,0	2,8	63	4,5	4,0	3,5	38	2,7	2,7	3,0	38	3,7	3,6	3,5
84	2,5	3,0	3,8	85	5,5	4,0	5,5	44	2,7	2,7	3,0	44	3,7	3,6	3,5
112	1,5	2,0	1,8	113	3,5	3,0	4,5	52	2,7	2,7	3,0	52	3,7	3,6	3,5
164	1,5	3,0	2,8	170	4,5	4,0	3,5	62	2,7	2,7	2,0	63	3,7	3,6	3,5
373	0,5	1,0	1,8	373	3,5	4,0	3,5	84	2,7	1,7	2,0	85	3,7	3,6	3,5
								112	0,7	0,7	1,0	113	3,7	2,6	4,5
								164	0,7	0,7	2,0	170	4,7	3,6	4,5
								372	-0,3	0,7	0,0	372	3,7	3,6	3,5

Betonin F3/022 kutistumakoekappaleiden painojen muutokset
mittausjakson aikana

Hionnan vaikutus kappaleen painoon on eliminoitu taulukoista siten,
että painon muutos ennen ja jälkeen hionnan on merkitty samaksi.

F3/022/H RH 65 %				F3/022/H RH 85 %				F3/022/N RH 65 %				F3/022/N RH 85 %			
Aika [d]	Painon muutos [g]			Aika [d]	Painon muutos [g]			Aika [d]	Painon muutos [g]			Aika [d]	Painon muutos [g]		
	Kpl 13	Kpl 14	Kpl 15		Kpl 16	Kpl 17	Kpl 18		Kpl 19	Kpl 20	Kpl 21		Kpl 22	Kpl 23	Kpl 24
1	0,0	0,0	0,0	1	0,0	0,0	0,0	1	0,0	0,0	0,0	1	0,0	0,0	0,0
3	-1,4	1,7	1,8	3	1,4	1,5	1,2	2	3,7	4,1	3,9	2	3,9	3,9	4,0
4	-0,2	3,1	3,5	4	3,2	3,0	2,6	3	4,0	5,0	4,6	3	4,9	4,4	4,7
6	0,9	3,8	4,0	6	4,0	3,9	3,5	4	5,4	5,6	5,3	4	5,5	5,3	5,3
7	0,9	3,8	4,0	7	4,0	3,9	3,5	6	5,5	6,0	6,0	6	5,8	5,6	5,6
8	0,4	2,8	4,6	8	3,1	2,3	2,9	7	5,5	6,0	6,0	7	5,8	5,6	5,6
9	0,4	2,8	3,6	9	3,1	2,3	2,9	8	4,8	5,3	6,4	8	4,9	3,1	4,5
11	0,4	2,8	3,6	11	3,1	2,3	2,9	9	4,8	5,3	6,4	9	4,9	3,1	4,5
12	0,4	2,8	2,6	12	3,1	2,3	2,9	11	4,8	5,3	6,4	11	4,9	3,1	4,5
13	0,4	2,8	2,6	13	3,1	2,3	2,9	12	4,8	4,3	5,4	12	4,9	4,1	4,5
14	0,4	2,8	2,6	14	3,1	2,3	2,9	13	4,8	4,3	5,4	13	4,9	4,1	4,5
15	0,4	2,8	2,6	15	3,1	2,3	2,9	14	3,8	2,3	4,4	14	5,9	4,1	4,5
18	0,4	2,8	2,6	18	2,1	2,3	1,9	15	3,8	2,3	4,4	15	5,9	4,1	4,5
22	0,4	2,8	2,6	22	2,1	2,3	1,9	17	2,8	4,3	4,4	17	4,9	5,1	5,5
26	0,4	2,8	2,6	26	4,1	3,3	2,9	18	2,8	4,3	4,4	18	4,9	5,1	5,5
29	0,4	2,8	2,6	29	4,1	3,3	2,9	20	3,8	3,3	4,4	20	4,9	4,1	4,5
36	0,4	2,8	2,6	36	4,1	3,3	3,9	22	3,8	3,3	4,4	22	4,9	4,1	4,5
42	0,4	2,8	2,6	42	4,1	3,3	3,9	26	2,8	3,3	3,4	26	5,9	4,1	5,5
60	-0,6	2,8	2,6	61	4,1	3,3	2,9	29	2,8	3,3	3,4	29	5,9	4,1	5,5
82	0,4	2,8	3,6	83	3,1	4,3	3,9	36	2,8	2,3	4,4	36	6,9	5,1	5,5
110	-0,6	1,8	2,6	111	4,1	4,3	3,9	42	2,8	2,3	4,4	42	6,9	5,1	5,5
162	-0,6	2,8	3,6	168	4,1	4,3	4,9	50	2,8	2,3	4,4	50	6,9	5,1	5,5
372	-1,6	2,8	2,6	372	4,1	3,3	2,9	60	1,8	2,3	2,4	61	4,9	5,1	4,5
								82	2,8	2,3	3,4	83	5,9	4,1	4,5
								110	0,8	0,3	1,4	111	5,9	4,1	4,5
								162	1,8	0,3	1,4	168	5,9	5,1	4,5
								372	0,8	0,3	1,4	372	4,9	4,1	4,5

Betonin F26/026/SAP kutistumakoe­kappaleiden painojen muutokset
mittausjakson aikana

Hionnan vaikutus kappaleen painoon on eliminoitu taulukoista siten,
että painon muutos ennen ja jälkeen hionnan on merkitty samaksi.

F26/026/SAP/H RH 65 %				F26/026/SAP/H RH 85 %				F26/026/SAP/N RH 65 %				F26/026/SAP/N RH 85 %			
Aika [d]	Painon muutos [g]			Aika [d]	Painon muutos [g]			Aika [d]	Painon muutos [g]			Aika [d]	Painon muutos [g]		
	Kpl 13	Kpl 14	Kpl 15		Kpl 16	Kpl 17	Kpl 18		Kpl 19	Kpl 20	Kpl 21		Kpl 22	Kpl 23	Kpl 24
1	0,0	0,0	0,0	1	0,0	0,0	0,0	1	0,0	0,0	0,0	1	0,0	0,0	0,0
3	1,4	1,2	0,9	3	1,1	0,7	0,7	2	4,7	3,4	4,2	2	3,2	3,4	3,5
4	1,7	1,7	1,2	4	1,2	0,9	1,0	3	5,1	4,7	4,7	3	4,3	4,1	4,2
5	1,7	1,7	1,2	5	1,2	0,9	1,0	4	5,1	4,7	4,7	4	4,3	4,1	4,2
7	0,4	1,0	1,9	7	1,1	-0,6	0,4	5	5,7	5,5	5,4	5	4,6	4,6	4,5
8	1,4	1,0	0,9	8	1,1	0,4	0,4	7	5,2	4,5	4,6	7	4,9	3,9	5,8
9	1,4	1,0	0,9	9	1,1	0,4	0,4	8	4,2	3,5	4,6	8	4,9	3,9	3,8
10	1,4	1,0	0,9	10	0,1	0,4	1,4	9	4,2	3,5	4,6	9	4,9	3,9	3,8
11	1,4	1,0	0,9	11	0,1	0,4	1,4	10	3,2	3,5	3,6	10	3,9	2,9	4,8
13	1,4	1,0	-0,1	13	-0,9	-0,6	0,4	11	3,2	3,5	3,6	11	3,9	2,9	4,8
14	1,4	1,0	-0,1	14	-0,9	-0,6	0,4	13	3,2	3,5	2,6	13	3,9	2,9	2,8
15	0,4	0,0	-0,1	15	-0,9	-0,6	0,4	14	3,2	3,5	2,6	14	3,9	2,9	2,8
16	0,4	0,0	-0,1	16	-0,9	-0,6	0,4	15	3,2	2,5	2,6	15	2,9	2,9	3,8
17	0,4	0,0	-0,1	17	-0,9	-0,6	0,4	16	3,2	2,5	2,6	16	2,9	2,9	3,8
18	0,4	0,0	-0,1	18	-0,9	-0,6	0,4	17	3,2	2,5	2,6	17	2,9	2,9	3,8
22	0,4	0,0	-1,1	22	-0,9	-0,6	0,4	18	3,2	2,5	2,6	18	2,9	2,9	3,8
25	0,4	0,0	-1,1	25	-0,9	-0,6	0,4	22	3,2	1,5	1,6	22	3,9	2,9	3,8
32	1,4	1,0	-0,1	32	0,1	0,4	0,4	25	3,2	1,5	1,6	25	3,9	2,9	3,8
38	1,4	1,0	-0,1	38	0,1	0,4	0,4	32	3,2	2,5	2,6	32	3,9	2,9	3,8
46	1,4	1,0	-0,1	46	0,1	0,4	0,4	38	3,2	2,5	2,6	38	3,9	2,9	3,8
56	0,4	0,0	-0,1	57	0,1	-0,6	0,4	46	3,2	2,5	2,6	46	3,9	2,9	3,8
78	0,4	0,0	-0,1	79	0,1	0,4	1,4	56	2,2	1,5	1,6	57	3,9	2,9	3,8
106	-0,6	-1,0	-2,1	107	-0,9	-0,6	0,4	78	2,2	1,5	1,6	79	2,9	1,9	2,8
158	0,4	0,0	-0,1	164	-0,9	0,4	-0,6	106	0,2	-0,5	-0,4	107	3,9	1,9	2,8
372	-0,6	-1,0	-1,1	372	-0,9	0,4	0,4	158	0,2	0,5	0,6	164	4,9	2,9	3,8
								372	0,2	-1,5	-0,4	372	3,9	2,9	3,8

Aika [d]	Painon muutos [g]	Aika [d]	Painon muutos [g]	Aika [d]	Painon muutos [g]	Aika [d]	Painon muutos [g]
F26/022/H		F26/022/H		F26/022/N		F26/022/N	
RH 65 %		RH 85 %		RH 65 %		RH 85 %	
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	-1	1	0	1	1
2	0	2	-1	2	0	2	1
3	0	3	-1	3	1	3	1
5	0	5	0	4	0	4	1
6	1	6	-1	6	0	6	1
7	0	8	0	7	0	7	1
12	0	12	0	9	0	9	2
20	1	20	1	13	0	13	2
30	0	30	0	21	-1	21	2
54	0	55	1	31	-2	31	1
76	0	77	1	55	-4	56	2
104	0	105	0	77	-4	78	1
156	-1	167	3	105	-6	106	-1
365	-2	365	2	157	-6	168	1
				365	-8	365	0
F3/022/H		F3/022/H		F3/022/N		F3/022/N	
RH 65 %		RH 85 %		RH 65 %		RH 85 %	
0	0	0	0	0	0	0	0
1	-1	1	3	1	-1	1	0
2	-1	2	3	2	-1	2	0
4	-1	4	3	5	-2	4	1
5	-1	5	3	6	-2	5	0
7	-1	7	3	7	-1	7	-1
11	-1	11	5	10	-3	10	0
19	-2	19	5	11	-2	11	0
29	-1	29	3	19	-4	19	0
53	0	54	5	29	-4	29	1
75	0	76	4	53	-3	54	1
103	-2	104	4	75	-6	76	0
154	-1	172	6	103	-8	104	-1
365	-3	365	6	154	-9	166	0
				365	-12	365	-1
F26/026/SAP/H		F26/026/SAP/H		F26/026/SAP/N		F26/026/SAP/N	
RH 65 %		RH 85 %		RH 65 %		RH 85 %	
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	-1	1	-3	1	-1
2	-1	2	0	2	-3	2	-3
3	-1	3	1	3	-3	3	-3
6	-1	6	0	6	-5	6	-3
7	-1	7	0	7	-4	7	-2
15	-1	18	1	15	-8	18	-3
18	-1	25	1	18	-7	25	-3
25	-2	50	1	25	-7	50	-2
49	-2	72	0	49	-10	72	-2
71	-3	100	1	71	-10	100	-3
99	-3	168	2	99	-11	168	-1
150	-4	365	2	150	-14	365	-3
365	-7			365	-17		

Hybridirakennekokeiden tulokset: taivutuslujuus

Liite 12a

		1	2	3	4	5	6	ka	kh
[kN]	Palkki 1								
	C+F26/022/N	28,6	25,3	21,5	26,4	19,5	26,8	24,7	3,4
[N/mm2]		8,8	7,8	6,7	8,0	6,0	8,3	7,6	1,1
	M+F26/022/H	14,3	43,4	46,4	33,4	21,8	47,9	34,5	13,3
		4,4	13,2	14,3	10,3	7,2	15,0	10,7	4,2
	C+F3/022/N	25,8	27,9	24,4	16,5	9,0	27,9	21,9	7,6
		7,7	8,4	7,5	5,1	2,8	8,4	6,4	2,3
	M+F3/022/H	28,8	19,4	21,3	38,3	15,3	23,8	24,5	8,1
		8,7	5,8	6,5	11,3	4,8	7,3	7,4	2,3
	C+F26/026/SAP/N	16,0	9,6	10,1	14,7	16,9	7,1	12,4	4,0
		4,9	3,0	3,1	4,2	5,1	2,1	3,7	1,2
	M+F26/026/SAP/H	11,7	9,0	9,5	14,0	11,0	18,0	12,2	3,3
		3,4	2,8	2,9	4,3	3,4	5,9	3,8	1,2
		1	2	3	4	5	6	ka	kh
[kN]	Palkki 2								
	C+F26/022/N	8,7	14,0	9,2	7,1	9,2	11,5	10,0	2,4
[N/mm2]		2,6	4,2	2,8	2,2	2,8	3,5	3,0	0,7
	M+F26/022/H	9,8	10,0	10,0	8,2	8,4	11,8	9,7	1,3
		2,9	3,0	3,1	2,5	2,5	3,6	2,9	0,4
	C+F3/022/N	9,4	11,5	10,9	10,2	10,8	10,3	10,5	0,7
		2,8	3,4	3,2	3,1	3,2	3,0	3,1	0,2
	M+F3/022/H	8,5	10,9	8,5	10,2	12,2	11,6	10,3	1,6
		2,5	3,3	2,4	3,0	3,7	3,5	3,1	0,5
	C+F26/026/SAP/N	11,6	12,2	11,5	11,5	11,0	10,4	11,4	0,6
		3,5	3,6	3,5	3,4	3,3	3,1	3,4	0,2
	M+F26/026/SAP/H	9,5	11,9	10,5	12,5	12,1	11,3	11,3	1,1
		2,8	3,7	3,1	3,8	3,6	3,4	3,4	0,3
		1	2	3	4	5	6	ka	kh
[kN]	Palkki A								
	F26/022/N	32,0	32,1	31,0	29,6	31,7	28,1	30,7	1,6
[N/mm2]		9,9	9,6	9,3	9,2	9,5	8,7	9,4	0,4
	F26/022/H	42,8	45,1	44,6	43,5	41,5	45,5	43,9	1,5
		12,9	13,5	13,4	13,3	12,5	14,1	13,3	0,6
	F3/022/N	24,7	24,4	21,5	20,6	27,0	21,4	23,3	2,5
		7,4	7,6	6,7	6,5	8,1	6,4	7,1	0,7
	F3/022/H	38,6	40,6	39,8	37,3	37,5	37,5	38,6	1,4
		11,6	12,2	11,9	11,2	11,3	11,3	11,6	0,4
	F26/026/SAP/N	22,5	20,8	19,3	22,4	21,0	22,2	21,4	1,3
		6,7	6,4	5,9	6,9	6,5	6,9	6,6	0,4
	F26/026/SAP/H	18,1	15,5	16,4	19,9	17,7	17,5	17,5	1,5
		5,5	4,8	5,0	6,1	5,4	5,4	5,4	0,5
	C	10,9	11,9	14,7	11,5	12,0	13,9	12,5	1,5
		3,4	3,7	4,4	3,5	3,7	4,3	3,8	0,4
	M	12,2	13,2	10,9	10,6	12,2	11,6	11,8	0,9
		3,8	4,1	3,3	3,3	3,7	3,7	3,7	0,3

Ka = keskiarvo, kh = keskihajonta

Hybridirakennekokeiden tulokset: leikkauslujuus

Liite 12b

		1	2	3	4	5	6	ka	kh
[kN]	Palkki 3								
	C+F26/022/N	454,0	463,0	372,0	441,0	484,0	355,0	428,2	52,3
[N/mm2]		5,0	5,1	4,1	4,9	5,4	3,9	4,8	0,6
	M+F26/022/H	463,0	403,0	433,0	401,0	491,0	421,0	435,3	35,5
		5,1	4,5	4,8	4,5	5,5	4,7	4,8	0,4
	C+F3/022/N	404,0	416,0	365,0	386,0	479,0	472,0	420,3	46,1
		4,5	4,6	4,1	4,3	5,3	5,2	4,7	0,5
	M+F3/022/H	359,0	477,0	398,0	453,0	496,0	528,0	451,8	63,1
		4,0	5,3	4,4	5,0	5,5	5,9	5,0	0,7
	C+F26/026/SAP/N	409,0	422,0	356,0	471,0	510,0	488,0	442,7	57,4
		4,5	4,7	4,0	5,2	5,7	5,4	4,9	0,6
	M+F26/026/SAP/H	591,0	451,0	475,0	529,0	372,0	507,0	487,5	74,4
		6,6	5,0	5,3	5,9	4,1	5,6	5,4	0,8
		1	2	3	4	5	6	ka	kh
[kN]	Palkki B								
	F26/022/N	516,0	1079,0	972,0	539,0	441,0	471,0	669,7	279,8
[N/mm2]		5,7	12,0	10,8	6,0	4,9	5,2	7,4	3,1
	F26/022/H	755,0	1312,0	866,0	805,0	1078,0	788,0	934,0	218,3
		8,4	14,6	9,6	9,0	12,0	8,8	10,4	2,4
	F3/022/N	1232,0	539,0	465,0	431,0	506,0	469,0	607,0	308,4
		13,7	6,0	5,2	4,8	5,6	5,2	6,7	3,4
	F3/022/H	676,0	668,0	798,0	716,0	758,0	1245,0	810,2	218,6
		7,5	7,4	8,9	8,0	8,4	13,8	9,0	2,4
	F26/026/SAP/N	1250,0	1271,0	762,0	920,0	1150,0	833,0	1031,0	220,7
		13,9	14,1	8,5	10,2	12,8	9,3	11,5	2,5
	F26/026/SAP/H	1560,0	395,0	1176,0	1392,0	1489,0	1305,0	1219,5	426,0
		17,3	4,4	13,1	15,5	16,6	14,5	13,5	4,7
	C	313,0	299,0	306,0	298,0	313,0	283,0	302,0	11,3
		3,5	3,3	3,4	3,3	3,5	3,2	3,4	0,1
	M	286,0	312,0	290,0	275,0	273,0	298,0	289,0	14,6
		3,2	3,5	3,2	3,1	3,0	3,3	3,2	0,2

Ka = keskiarvo, kh = keskihajonta

400 mm Demec	Kutistuma												Aika	Keskiarvo		Keskiarvo		Keskiarvo		Keskiarvo	
7.11.2005	Kpl 1				Kpl 2				Kpl 3				[d]	Kpl 1		Kpl 2		Kpl 3		Kaikki	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		1 & 3	2 & 4	1 & 3	2 & 4	1 & 3	2 & 4	C	F26/022/N
8.11.2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
9.11.2005	-12	44	-28	-36	-20	48	-28	76	24	36	-12	28	2	-20	4	-24	62	6	32	-13	33
10.11.2005	-8	84	-20	-8	-20	60	-32	108	24	76	4	68	3	-14	38	-26	84	14	72	-9	65
14.11.2005	32	244	0	164	44	228	8	252	52	224	32	232	7	16	204	26	240	42	228	28	224
15.11.2005	60	312	24	228	72	312	32	324	68	272	32	292	8	42	270	52	318	50	282	48	290
16.11.2005	76	348	36	244	92	348	40	368	84	308	32	332	9	56	296	66	358	58	320	60	325
17.11.2005	72	364	40	244	96	380	44	400	92	340	32	368	10	56	304	70	390	62	354	63	349
22.11.2005	72	396	68	296	100	392	44	420	100	364	36	388	15	70	346	72	406	68	376	70	376
23.11.2005	88	404	64	296	116	404	44	420	120	376	40	400	16	76	350	80	412	80	388	79	383
24.11.2005	104	396	80	312	112	400	56	424	120	364	36	412	17	92	354	84	412	78	388	85	385
28.11.2005	100	384	84	304	120	396	52	420	128	364	44	400	21	92	344	86	408	86	382	88	378
29.11.2005	112	384	84	304	116	388	60	420	128	364	36	416	22	98	344	88	404	82	390	89	379
1.12.2005	128	392	88	304	140	396	68	416	140	364	56	420	24	108	348	104	406	98	392	103	382
5.12.2005	148	392	92	304	156	396	100	420	148	364	64	420	28	120	348	128	408	106	392	118	383

50 mm Demec	Kutistuma, laskettu												Aika	Ka	Ka	Ka	Ka
7.11.2005	Kpl 1				Kpl 2				Kpl 3				[d]	Kpl 1	Kpl 2	Kpl 3	Kaikki
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d					
8.11.2005	0	0					0	0			0	0	1	0	0	0	0
9.11.2005	126	75					-25	-126			75	-50	2	100	-75	13	13
10.11.2005	126	50					-25	-75			0	-75	3	88	-50	-38	0
14.11.2005	226	75					151	100			25	-75	7	151	126	-25	84
15.11.2005	201	126					126	100			326	126	8	163	113	226	167
16.11.2005	251	201					126	100			301	151	9	226	113	226	188
17.11.2005	151	100					176	75			326	151	10	126	126	238	163
22.11.2005	351	251					201	251			452	251	15	301	226	351	293
23.11.2005	377	251					176	251			477	301	16	314	213	389	305
24.11.2005	351	301					201	326			577	351	17	326	264	464	351
28.11.2005	351	301					251	251			427	301	21	326	251	364	314
29.11.2005	351	276					226	301			326	301	22	314	264	314	297
1.12.2005	427	301					276	301			427	351	24	364	289	389	347
5.12.2005	402	301					276	326			402	351	28	351	301	377	343

M+F26/022/H Hybridipalkki 1: kutistumatulokset

400 mm	Kutistuma												Aika	Keskiarvo		Keskiarvo		Keskiarvo		Keskiarvo	
Demec	Kpl 1				Kpl 2				Kpl 3				[d]	Kpl 1		Kpl 2		Kpl 3		Kaikki	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		1 & 3	2 & 4	1 & 3	2 & 4	1 & 3	2 & 4	M	F26/022/H
20.10.2005																					
21.10.2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
24.10.2005	-44	472	-4	392	-180	348	0	384	-136	468	16	476	4	-24	432	-90	366	-60	472	-58	423
25.10.2005	88	688	84	596	0	520	132	580	28	660	108	628	5	86	642	66	550	68	644	73	612
26.10.2005	80	640	80	556	16	484	100	560	12	600	108	592	6	80	598	58	522	60	596	66	572
27.10.2005	80	648	92	572	32	488	112	528	28	616	108	612	7	86	610	72	508	68	614	53	577
28.10.2005	88	636	88	556	48	500	120	540	28	604	104	616	8	88	596	84	520	66	610	57	575
31.10.2005	108	636	92	568	72	516	132	576	36	620	112	620	11	100	602	102	546	74	620	67	589
1.11.2005	132	640	88	564	64	516	144	584	36	620	128	652	12	110	602	104	550	82	636	71	596
2.11.2005	140	636	92	564	64	520	144	592	60	620	136	644	13	116	600	104	556	98	632	73	596
3.11.2005	144	636	88	564	60	520	144	588	60	628	140	640	14	116	600	102	554	100	634	73	596
7.11.2005	156	632	108	560	60	520	152	588	80	620	144	652	18	132	596	106	554	112	636	79	595
8.11.2005	160	632	104	560	72	528	156	604	80	612	140	656	19	132	596	114	566	110	634	82	599
9.11.2005	164	640	108	560	84	524	160	604	88	612	148	652	20	136	600	122	564	118	632	86	599
10.11.2005	164	640	112	560	92	520	172	612	96	612	156	656	21	138	600	132	566	126	634	90	600
14.11.2005	172	640	124	556	100	532	164	604	104	616	160	660	25	148	598	132	568	132	638	93	601
15.11.2005	168	632	128	560	104	528	160	604	100	608	160	660	26	148	596	132	566	130	634	93	599
16.11.2005	172	640	128	556	96	524	172	612	104	612	160	656	27	150	598	134	568	132	634	95	600
17.11.2005	180	640	124	560	96	520	168	608	108	616	168	656	28	152	600	132	564	138	636	95	600

C+F3/022/N

Hybridipalkki 1: kutistumatulokset

400 mm Demec	Kutistuma												Aika	Keskiarvo		Keskiarvo		Keskiarvo		Keskiarvo	
17.1.2006	Kpl 1				Kpl 2				Kpl 3				[d]	Kpl 1		Kpl 2		Kpl 3		Kaikki	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		1 & 3	2 & 4	1 & 3	2 & 4	1 & 3	2 & 4	C	F3/022/N
18.1.2006		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
19.1.2006		36	-4	4	4	36	0	12	-4	40	8	52	2	-4	20	2	24	2	46	0	30
23.1.2006		168	20	148	52	156	28	180	36	164	44	184	6	20	158	40	168	40	174	33	167
26.1.2006		320	108	296	156	308	124	308	124	296	116	320	9	108	308	140	308	120	308	123	308
30.1.2006		396	196	404	184	400	172	400	172	388	152	400	13	196	400	178	400	162	394	179	398
2.2.2006		528	280	516	280	512	248	520	260	488	228	520	16	280	522	264	516	244	504	263	514
6.2.2006		528	296	520	300	528	268	520	280	512	252	528	20	296	524	284	524	266	520	282	523
9.2.2006		528	320	516	324	528	288	520	304	516	264	540	23	320	522	306	524	284	528	303	525
13.2.2006		528	336	536	344	540	312	548	332	528	292	544	27	336	532	328	544	312	536	325	537
14.2.2006		532	340	536	352	544	308	540	320	516	292	544	28	340	534	330	542	306	530	325	535
50 mm Demec	Kutistuma																				
17.1.2006	Kpl 1				Kpl 2				Kpl 3				Aika	Ka	Ka	Ka	Ka				
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	[d]	Kpl 1	Kpl 2	Kpl 3	Kaikk i				
18.1.2006		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0				
19.1.2006		-50	100	75	25	-25	0	0	-50	126	25	-75	2	42	0	6	16				
23.1.2006		50	151	276	0	75	25	126	0	126	25	-50	6	159	56	25	80				
26.1.2006		75	100	351	25	0	0	151	50	326	176	0	9	176	44	138	119				
30.1.2006		75	126	351	0	75	151	201	50	427	151	0	13	184	107	157	149				
2.2.2006		126	201	452	25	75	176	226	50	427	226	100	16	259	126	201	195				
6.2.2006		226	201	527	50	100	226	251	25	577	276	100	20	318	157	245	240				
9.2.2006		201	201	452	75	75	201	226	25	552	276	100	23	284	144	238	222				
13.2.2006		176	176	427	75	75	226	251	25	527	276	100	27	259	157	232	216				
14.2.2006													28								

M+F3/022/H

Hybridipalkki 1: kutistumatulokset

400 mm Demec	Kutistuma												Aika	Keskiarvo		Keskiarvo		Keskiarvo		Keskiarvo	
15.2.2006	Kpl 1				Kpl 2				Kpl 3				[d]	Kpl 1		Kpl 2		Kpl 3		Kaikki	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		1 & 3	2 & 4	1 & 3	2 & 4	1 & 3	2 & 4	M	F3/022/H
16.2.2006	0	0		0	0	0	0	0	0	0		0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
21.2.2006	48	768		828	-12	664	124	864	180	820		756	6	48	798	56	764	180	788	95	783
23.2.2006	36	744		792	-12	664	124	832	164	792		728	8	36	768	56	748	164	760	85	759
27.2.2006	60	768		788	-16	652	160	860	168	800		756	12	60	778	72	756	168	778	100	771
1.3.2006	68	772		784	-16	652	136	844	148	800		744	14	68	778	60	748	148	772	92	766
2.3.2006	84	776		808	0	664	160	864	156	816		752	15	84	792	80	764	156	784	107	780
7.3.2006	88	776		792	-4	648	176	844	156	804		740	20	88	784	86	746	156	772	110	767
9.3.2006	96	780		796	8	648	188	832	156	808		740	22	96	788	98	740	156	774	117	767
13.3.2006	100	772		788	16	644	192	832	156	796		732	26	100	780	104	738	156	764	120	761
15.3.2006	100	768		784	24	648	212	824	152	792		736	28	100	776	118	736	152	764	123	759
50 mm Demec	Kutistuma																				
15.2.2006	Kpl 1				Kpl 2				Kpl 3				Aika	Ka	Ka	Ka	Ka				
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	[d]	Kpl 1	Kpl 2	Kpl 3	Kaikki				
16.2.2006	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0		1	0	0	0	0				
21.2.2006	351	-25	1104		402	577	853	201	527	326	151		6	477	508	335	440				
23.2.2006	326	201	1155		477	753	828	151	552	301	176		8	561	552	343	485				
27.2.2006	301	502	1155		452	753	828	151	527	226	151		12	653	546	301	500				
1.3.2006	251	527	1155		602	703	904	100	602	226	126		14	644	577	318	513				
2.3.2006	201	577	1205		678	678	979	50	552	176	151		15	661	596	293	517				
7.3.2006	201	653	1155		728	778	954	25	552	176	201		20	669	621	310	533				
9.3.2006	176	703	1205		728	803	979	0	602	176	176		22	694	628	318	547				
13.3.2006	151	703	1205		753	828	954	0	577	176	151		26	686	634	301	540				
15.3.2006	126	678	1180		728	803	929	50	577	176	151		28	661	628	301	530				

C+F26/026/SAP/H Hybridipalkki 1: kutistumatulokset

400 mm Demec	Kutistuma												Aika	Keskiarvo		Keskiarvo		Keskiarvo		Keskiarvo		
1.3.2006	Kpl 1				Kpl 2				Kpl 3				[d]	Kpl 1		Kpl 2		Kpl 3		Kaikki		
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		1 & 3	2 & 4	1 & 3	2 & 4	1 & 3	2 & 4	C	F26/026/SAP/N	
2.3.2006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
6.3.2006	-8	68	-8	76	0	44	-76	56	-20	32	24	80	5	-8	72	-38	50	2	56	-15	59	
8.3.2006	20	112	8	124	16	80	-104	96	-12	72	32	120	7	14	118	-44	88	10	96	-7	101	
9.3.2006	20	124	28	124	32	108	-44	112	12	80	64	128	8	24	124	-6	110	38	104	19	113	
13.3.2006	36	200	120	224	92	200	72	212	88	176	128	216	12	78	212	82	206	108	196	89	205	
16.3.2006	60	256	164	288	132	256	108	264	116	228	172	276	15	112	272	120	260	144	252	125	261	
20.3.2006	80	308	220	348	152	304	128	312	148	288	212	336	19	150	328	140	308	180	312	157	316	
23.3.2006	88	348	252	388	172	336	156	340	172	320	232	376	22	170	368	164	338	202	348	179	351	
27.3.2006	120	388	280	436	200	380	188	380	204	356	272	420	26	200	412	194	380	238	388	211	393	
29.3.2006	120	388	284	444	208	392	204	392	212	368	280	424	28	202	416	206	392	246	396	218	401	
50 mm Demec	Kutistuma												Aika	Ka	Ka	Ka	Ka					
1.3.2006	Kpl 1				Kpl 2				Kpl 3				[d]	Kpl 1	Kpl 2	Kpl 3	Kaikki					
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d										
2.3.2006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0					
6.3.2006	-75,3	-75,3	100,4	0	125,5	-25,1	-402	175,7	50,2	125,5	125,5	175,7	5	-12,55	-31,37	119,23	25					
8.3.2006	-50,2	-125	25,1	75,3	150,6	-75,3	-678	200,8	100,4	125,5	150,6	225,9	7	-18,82	-100,4	150,6	10					
9.3.2006	-25,1	0	100,4	50,2	125,5	125,5	-552	150,6	100,4	75,3	125,5	225,9	8	31,375	-37,65	131,78	42					
13.3.2006	326,3	75,3	125,5	75,3	175,7	401,6	-351	100,4	100,4	25,1	150,6	276,1	12	150,6	81,575	138,05	123					
16.3.2006	401,6	150,6	251	175,7	301,2	552,2	-201	175,7	125,5	100,4	200,8	301,2	15	244,73	207,08	181,98	211					
20.3.2006	476,9	200,8	301,2	200,8	351,4	702,8	-100	251	125,5	100,4	276,1	326,3	19	294,93	301,2	207,08	268					
23.3.2006	476,9	225,9	326,3	276,1	401,6	753	-25,1	301,2	125,5	125,5	326,3	351,4	22	326,3	357,68	232,18	305					
27.3.2006	527,1	301,2	351,4	326,3	451,8	778,1	25,1	326,3	175,7	175,7	351,4	376,5	26	376,5	395,33	269,83	347					
29.3.2006	552,2	301,2	351,4	301,2	451,8	803,2	50,2	301,2	175,7	175,7	351,4	376,5	28	376,5	401,6	269,83	349					

Lite 15a

M+F26/026/SAP/H Hybridipalkki 1: kutistumatulokset

400 mm Demec	Kutistuma												Aika	Keskiarvo		Keskiarvo		Keskiarvo		Keskiarvo	
22.2.2006	Kpl 1				Kpl 2				Kpl 3				[d]	Kpl 1		Kpl 2		Kpl 3		Kaikki	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		1 & 3	2 & 4	1 & 3	2 & 4	1 & 3	2 & 4	M	F26/026/SAP/H
23.2.2006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
27.2.2006	120	424	100	388	-4	392	-56	348	128	452	60	388	5	110	406	-30	370	94	420	58	399
1.3.2006	48	468	40	432	-12	424	-40	416	76	492	-12	412	7	44	450	-26	420	32	452	17	441
2.3.2006	28	432	28	408	-16	408	-48	396	60	464	-36	388	8	28	420	-32	402	12	426	3	416
7.3.2006	12	428	24	404	-12	404	-28	396	68	460	-24	396	13	18	416	-20	400	22	428	7	415
9.3.2006	4	432	44	416	-8	404	-16	396	68	456	-28	392	15	24	424	-12	400	20	424	11	416
13.3.2006	16	432	36	412	8	412	-12	396	84	464	-12	396	19	26	422	-2	404	36	430	20	419
16.3.2006	32	444	80	432	16	424	4	416	100	480	4	416	22	56	438	10	420	52	448	39	435
20.3.2006	48	452	84	436	28	436	12	416	116	484	16	412	26	66	444	20	426	66	448	51	439
22.3.2006	48	452	100	432	16	440	12	420	116	484	12	412	28	74	442	14	430	64	448	51	440

50 mm Demec	Kutistuma												Aika	Ka	Ka	Ka	Ka
22.2.2006	Kpl 1				Kpl 2				Kpl 3				[d]	Kpl 1	Kpl 2	Kpl 3	Kaikki
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d					
23.2.2006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
27.2.2006	-100	-100	25,1	100,4	175,7	0	426,7	-25,1	451,8	602,4	25,1	-251	5	-18,83	144,33	207,07	111
1.3.2006	75,3	-126	50,2	0	301,2	0	401,6	0	376,5	702,8	50,2	-301	7	-1E-12	175,7	207,07	128
2.3.2006	100,4	-126	100,4	75,3	276,1	0	476,9	50,2	376,5	627,5	100,4	-402	8	37,65	200,8	175,7	138
7.3.2006	75,3	-126	75,3	25,1	175,7	-75,3	426,7	-50,2	426,7	677,7	100,4	-402	13	12,55	119,23	200,8	111
9.3.2006	100,4	-176	25,1	-25,1	175,7	-100	401,6	-75,3	351,4	602,4	75,3	-402	15	-18,83	100,4	156,87	79
13.3.2006	100,4	-201	-50,2	-25,1	150,6	-201	451,8	-201	401,6	552,2	25,1	-427	19	-43,93	50,2	138,05	48
16.3.2006	150,6	-201	0	25,1	175,7	-176	401,6	-151	401,6	577,3	25,1	-452	22	-6,275	62,75	138,05	65
20.3.2006	150,6	-126	-50,2	25,1	125,5	-176	451,8	-176	476,9	627,5	25,1	-427	26	-1E-12	56,475	175,7	77
22.3.2006	150,6	-126	-25,1	0	150,6	-201	451,8	-201	476,9	577,3	25,1	-427	28	-3E-15	50,2	163,15	71

Lite 15b

Lujuus [kN]

Paksuus laatan keskeltä [mm]

Laatan paino [kg]

		1	2	3	4	5	6	ka	kh
F26/022/N	[kN]	27,94	30,17	27,81	33,09	32,00	31,44	30,4	2,18
	[mm]	50,1	50,2	50,7	50,8	51,3	51,0		
	[kg]	5,3	5,3	5,4	5,5	5,5	5,4		
F26/022/H	[kN]	42,77	43,36	39,27	37,97	38,19	38,44	40,0	2,42
	[mm]	50,2	49,9	50,1	48,7	49,6	50,3		
	[kg]	5,3	5,3	5,3	5,2	5,2	5,3		
F3/022/N	[kN]	19,13	19,96	24,34	23,31	21,04	21,45	21,5	1,98
	[mm]	49,7	49,6	51,3	50,5	51,2	49,9		
	[kg]	5,2	5,2	5,4	5,3	5,4	5,3		
F3/022/H	[kN]	45,08	42,16	45,29	43,33	42,04	34,43	42,1	3,99
	[mm]	49,7	50,3	52,0	52,3	50,3	49,7		
	[kg]	5,3	5,3	5,5	5,6	5,4	5,3		
F26/026/SAP/N	[kN]	27,39	27,05	32,37	24,34	24,37	23,29	26,5	3,32
	[mm]	51,4	50,2	51,1	51,1	51,2	51,7		
	[kg]	5,3	5,2	5,3	5,3	5,3	5,3		
F26/026/SAP/H	[kN]	28,95	25,96	28,49	30,6	22,04	27,11	27,2	2,98
	[mm]	52,5	50,5	53,7	49,8	52,1	52,0		
	[kg]	5,4	5,2	5,5	5,1	5,3	5,3		
C	[kN]	13,79	14,65	13,57	16,53	12,85	16,76	14,7	1,62
	[mm]	49,3	28,4	49,3	49,5	48,3	49,0		
	[kg]	5,3	5,5	5,3	5,3	5,1	5,3		
M	[kN]	14,69	12,51	15,22	14,15	13,76	14,34	14,1	0,93
	[mm]	51,8	51,2	52,6	52,5	52,7	51,4		
	[kg]	5,6	5,5	5,7	5,6	5,6	5,6		

Ka = keskiarvo, kh = keskihajonta